

A csillagok természetete, HRD, távolságmodulus

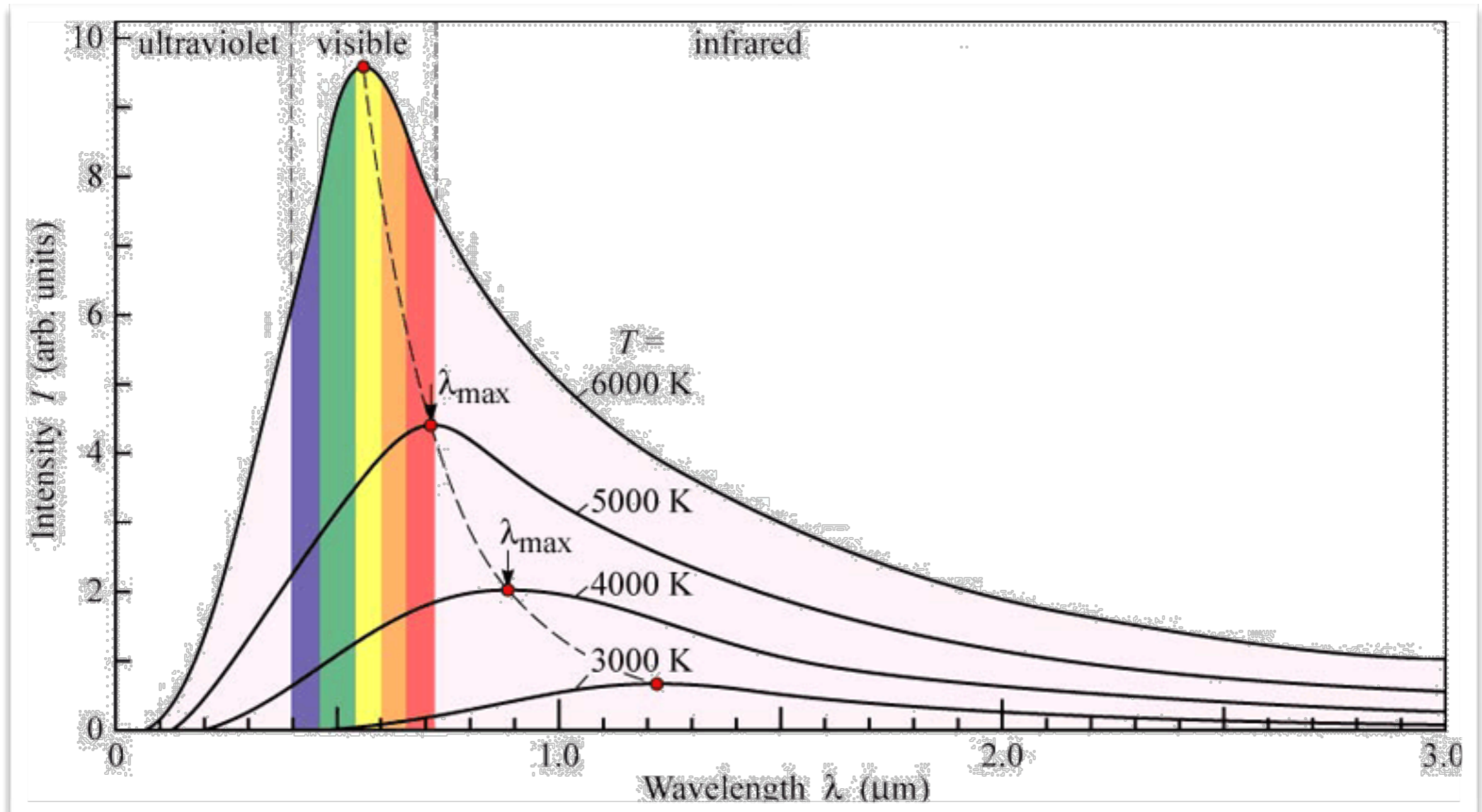
Egy kis obszervációs asztrofizika

(2020. március-április)

Alapvető jellemzők

- fényesség
- színekép
- szögátmérő (csillagkorong képe: átmérő + peremsötétedés)
- kettősségre utaló jelek

Színkép -> spektrális energiaeloszlás (SED)



(Univ. of Oregon)

Feketest-sugárzás: Planck-függvénnyel írható le

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

$$B_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Wien-féle eltolódási törvény:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

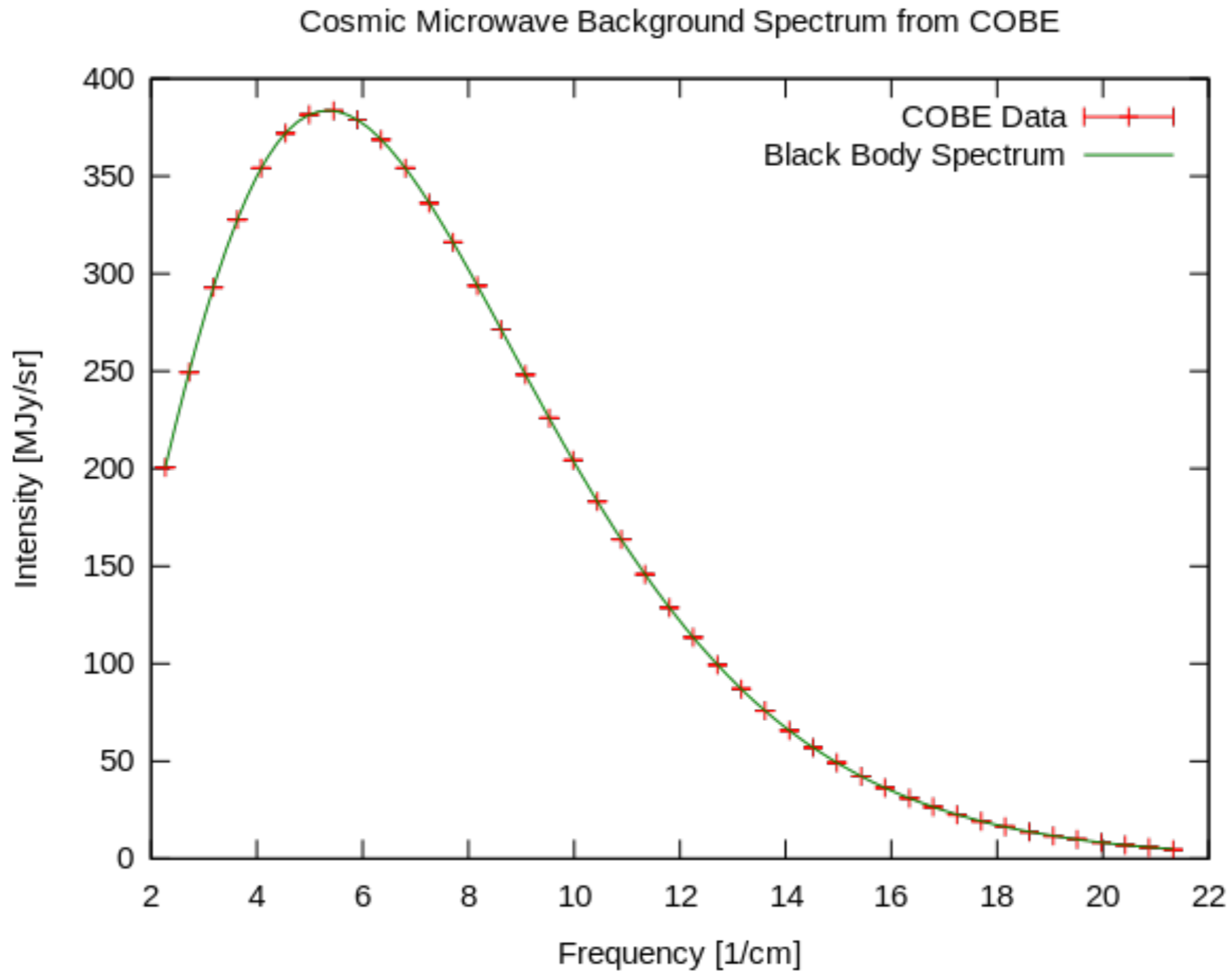
Stefan-Boltzmann törvény:

$$j^* = \sigma T^4.$$

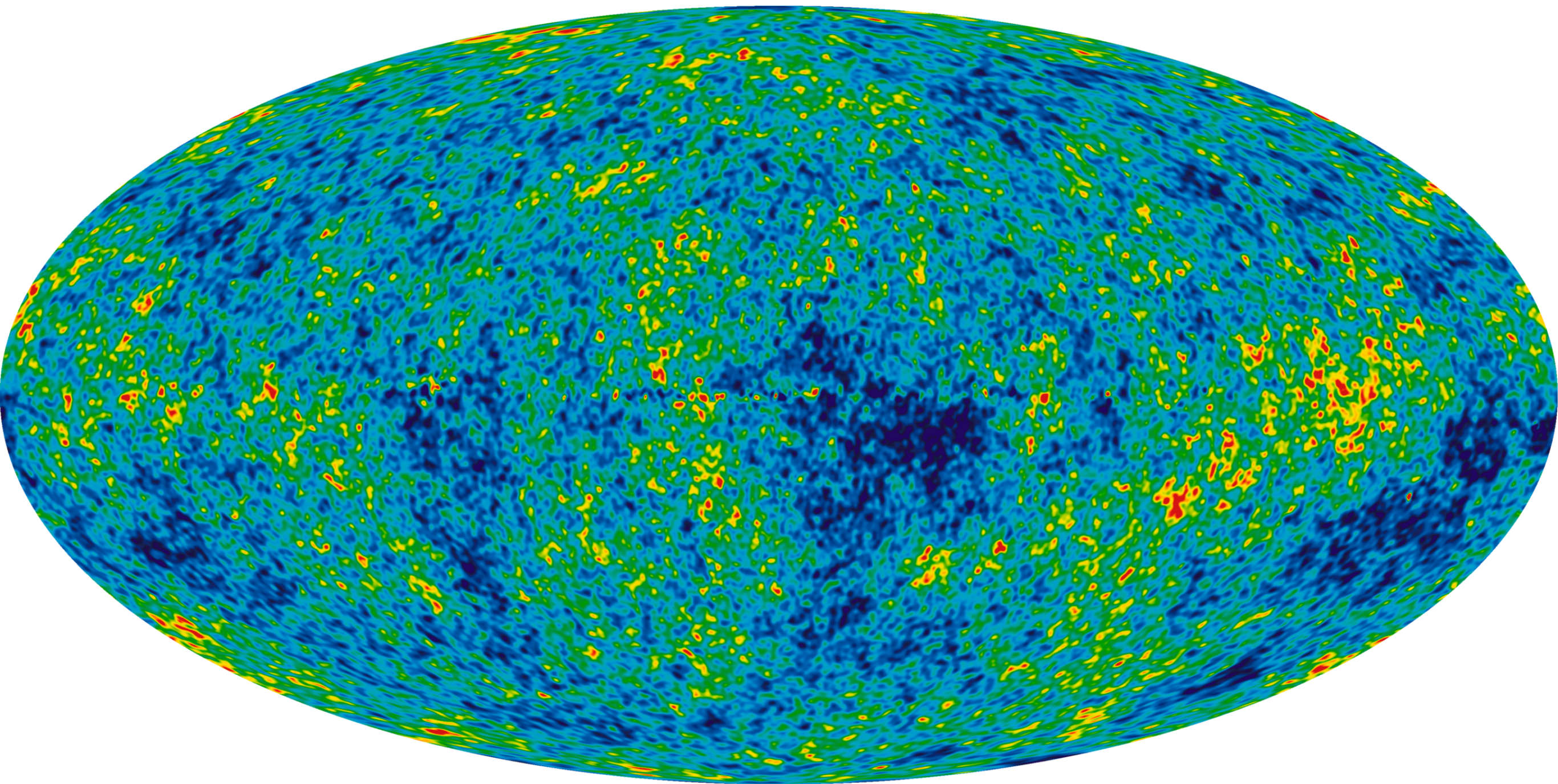
$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

csillagok luminozitása

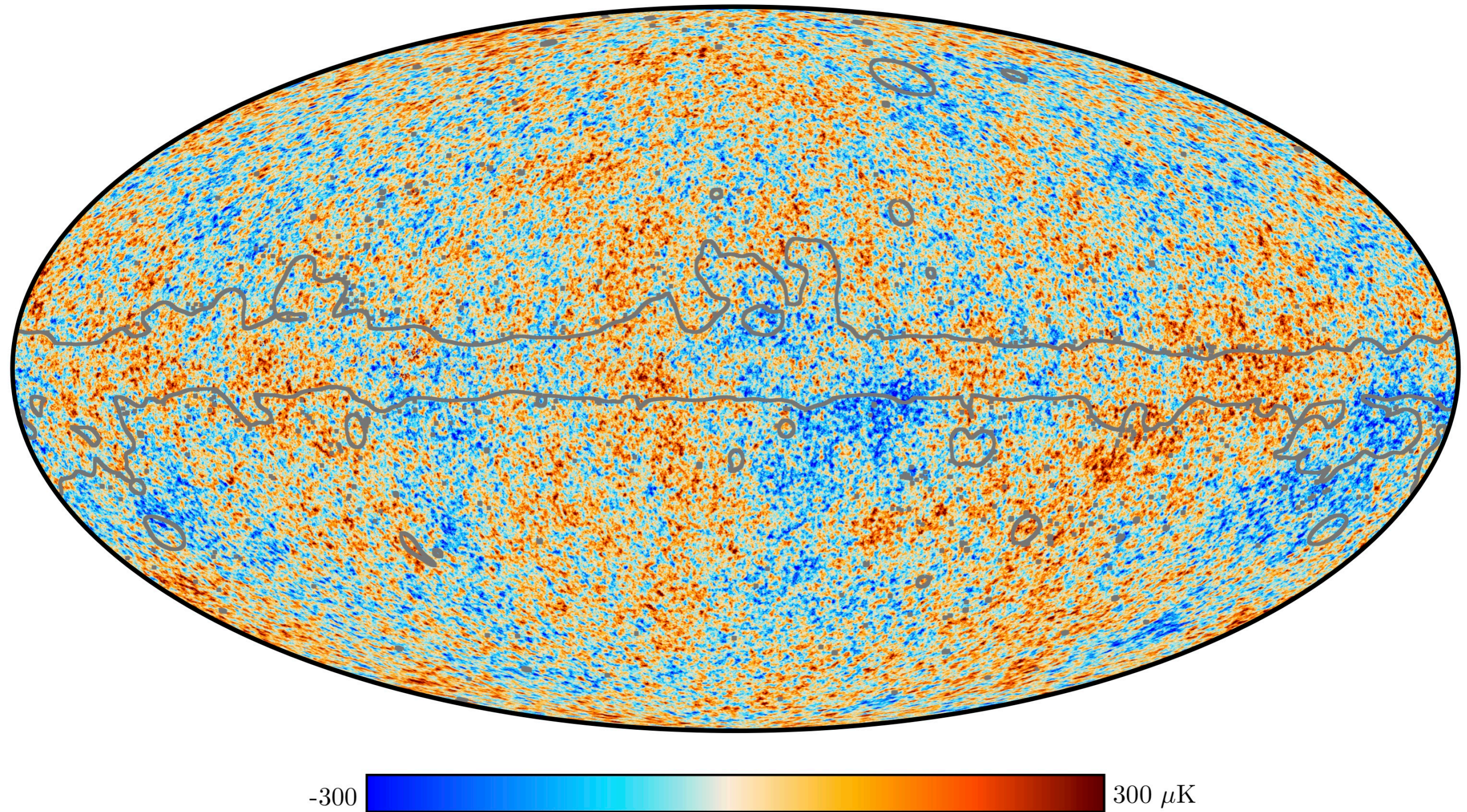
Tökéletes feketetest: kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás



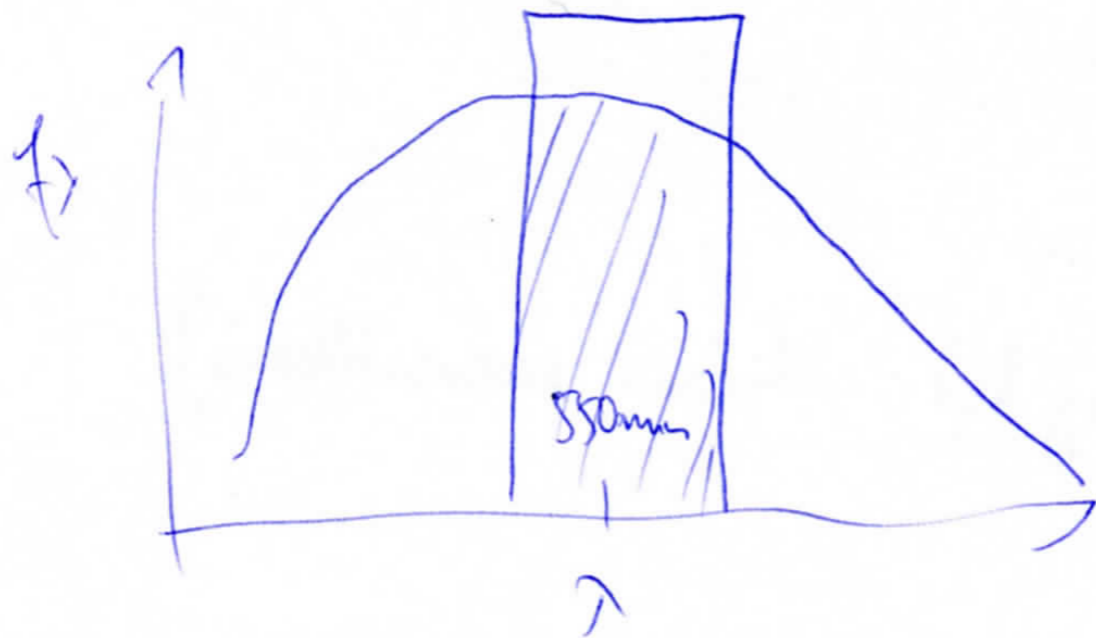
9 év WMAP



Planck (2018): térkép a mikrohullámú háttérsugárzásról -
csomósodás **irányok** szerint



Fényesség: valamilyen műköfisszával kiszámolt az SED go részét, majd integráljuk a fluxust ✓



$$F = \int_a^{\infty} f_{\lambda} d\lambda$$

Bolometric fényesség: $M_{bol} = -2.5 \log F$

Integrálom relatív a Napra vonatkozóan a bol. abszolút fényességet

$$M_{bol} - M_{bol, \odot} = -2.5 \log L/L_{\odot}$$

Árrol L a luminositás, sűrűség, fehérség. nyelvése

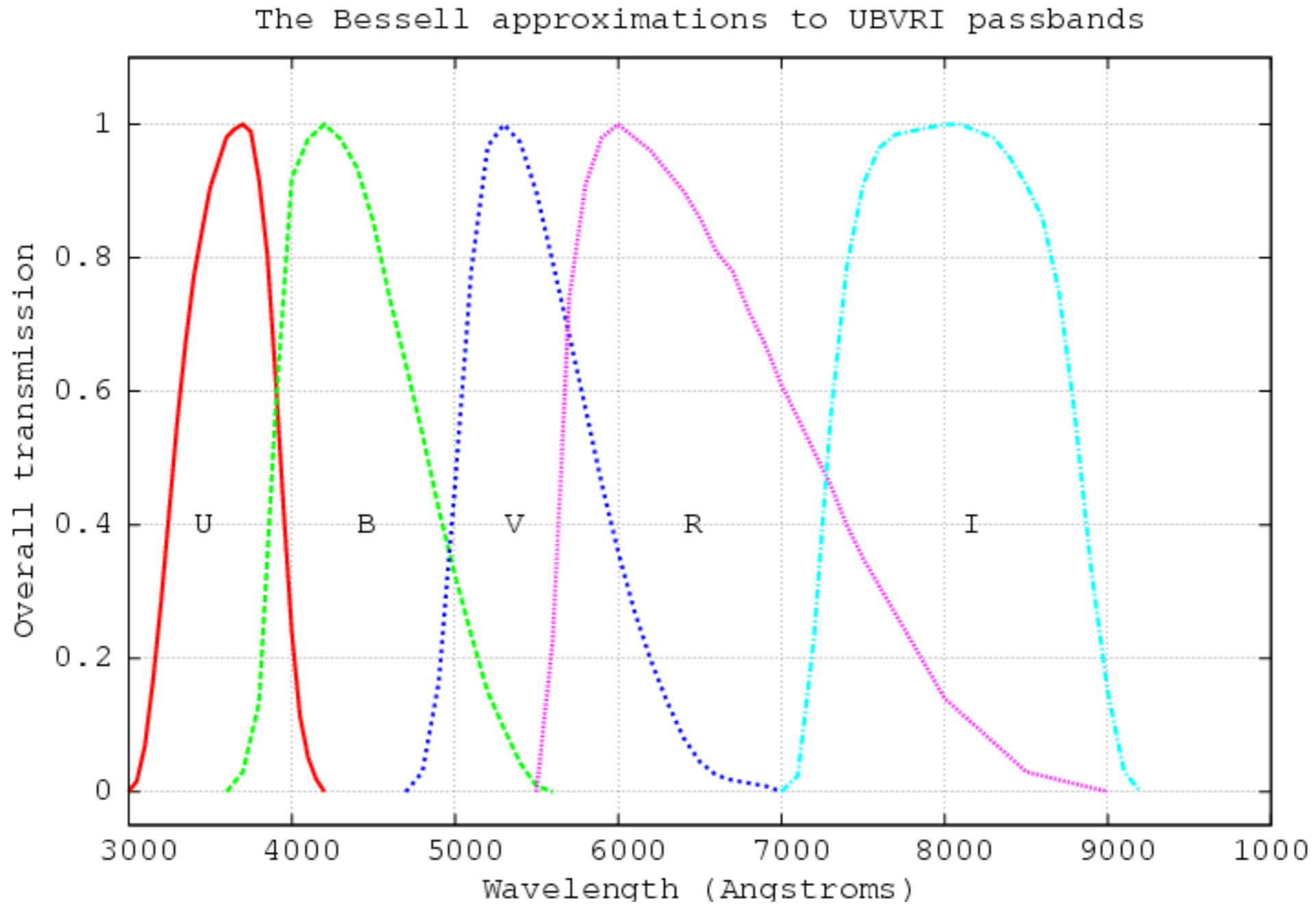
$$L \sim R^2 T_{\text{eff}}^4$$

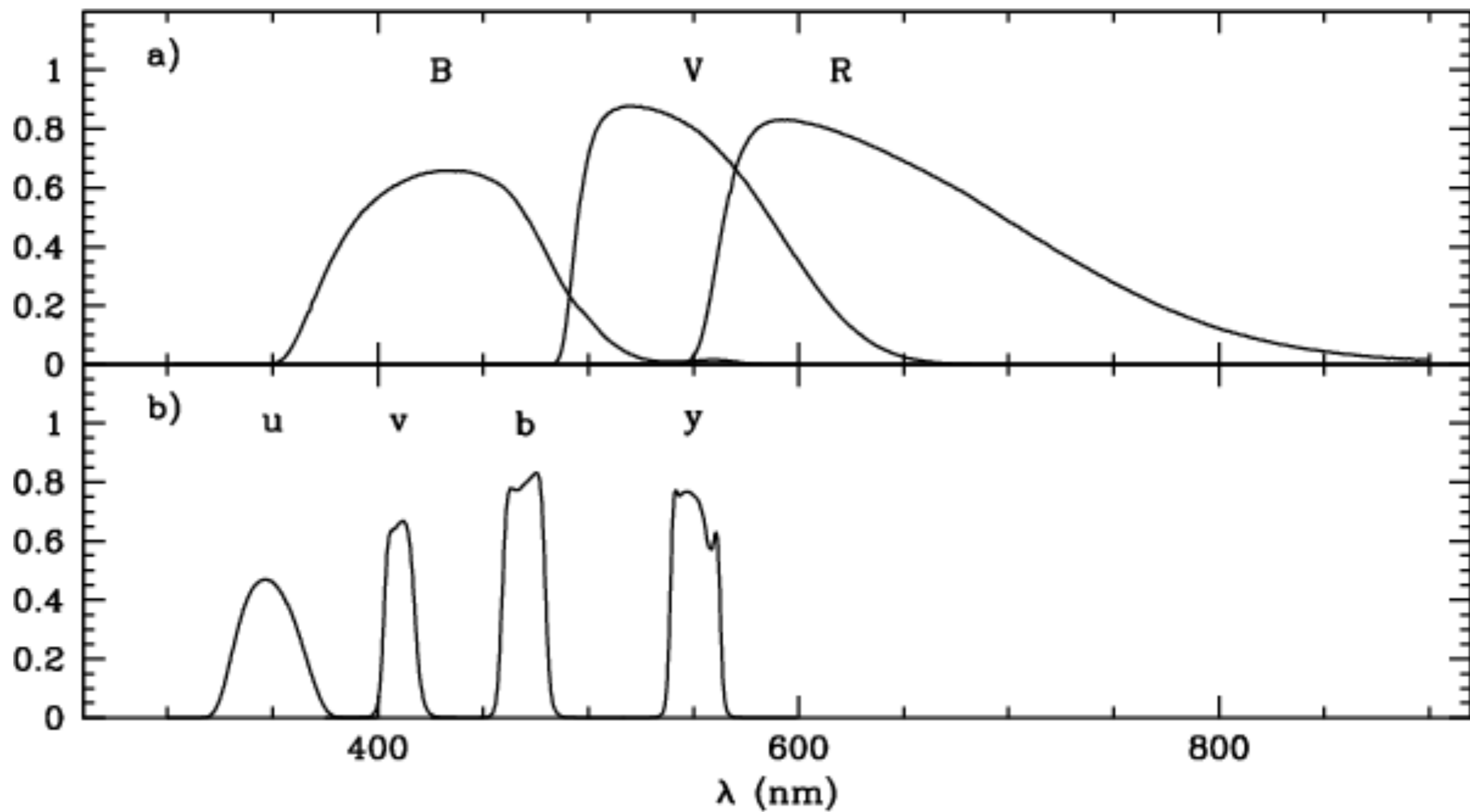
$$L/L_0 = \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\text{eff},0}}\right)^4$$

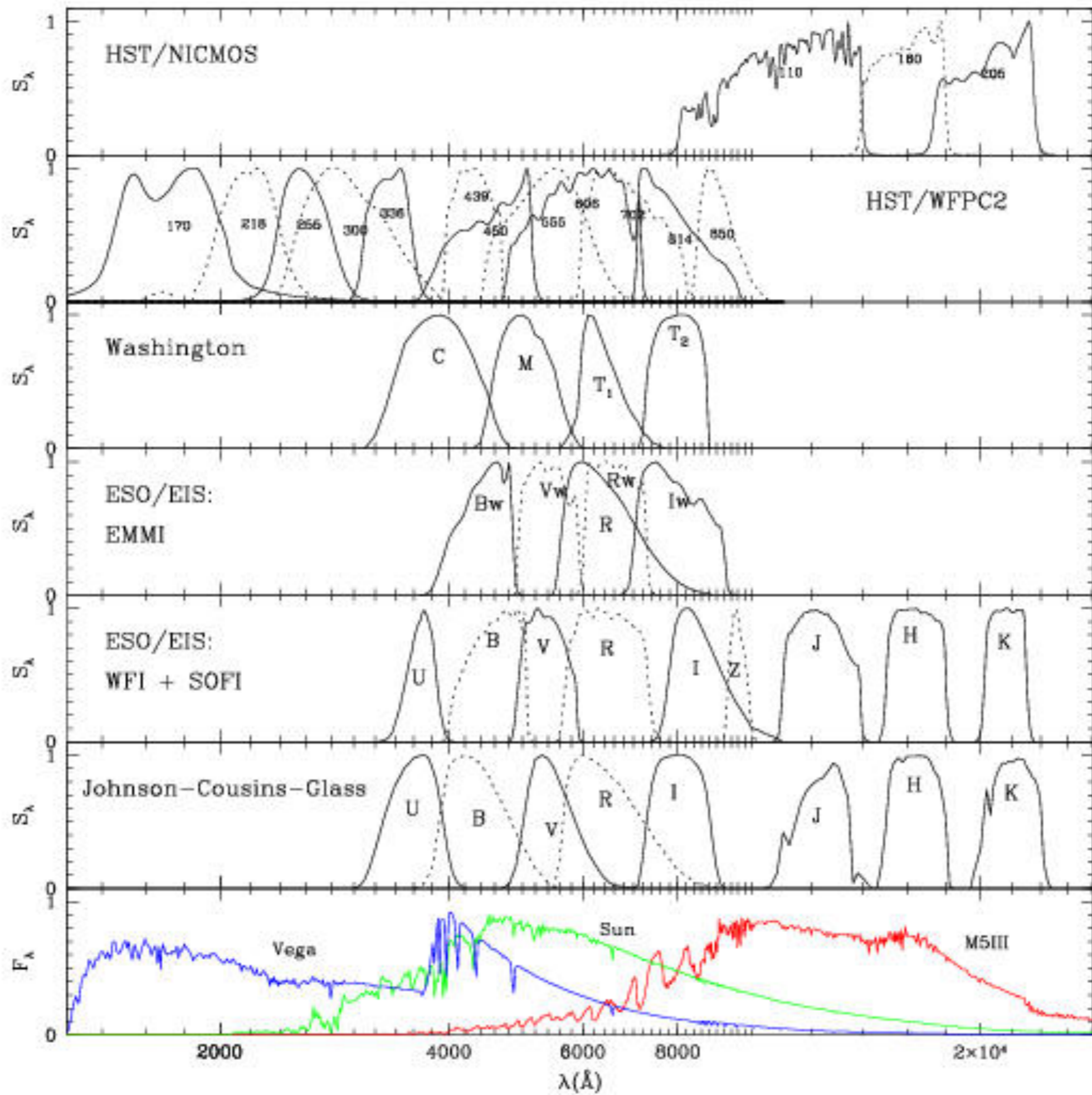
$$M_{\text{bol}} - M_{\text{bol},0} = -2.5 \log \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\text{eff},0}}\right)^4 = -5 \log \frac{R}{R_0} - 10 \log \frac{T}{T_{\text{eff},0}}$$

$$\left[\begin{array}{l} R_0 = 696\,000 \text{ km} \\ T_{\text{eff},0} = 5870 \text{ K} \end{array} \right]$$

Fotometriai rendszerek







Színindexek: B-V, V-R, V-I, J-K, H-K, (u-v)-(v-b)...

logaritmikus mennyiségek különbsége -> fluxusarány
fluxusarány 2, 3,... hullámhosszon -> SED alakja
SED alakja -> feketetestre T_{eff} ; nem feketetestre
további paraméterek (pl. fémisség, logg, ..., az SED
finom részleteit befolyásoló mennyiségek)

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{R}{d} \quad \text{látni mértéke}$$

$$L \sim R^2 T^4$$

$$M = -2.5 \log L \sim -5 \log R - 10 \log T$$

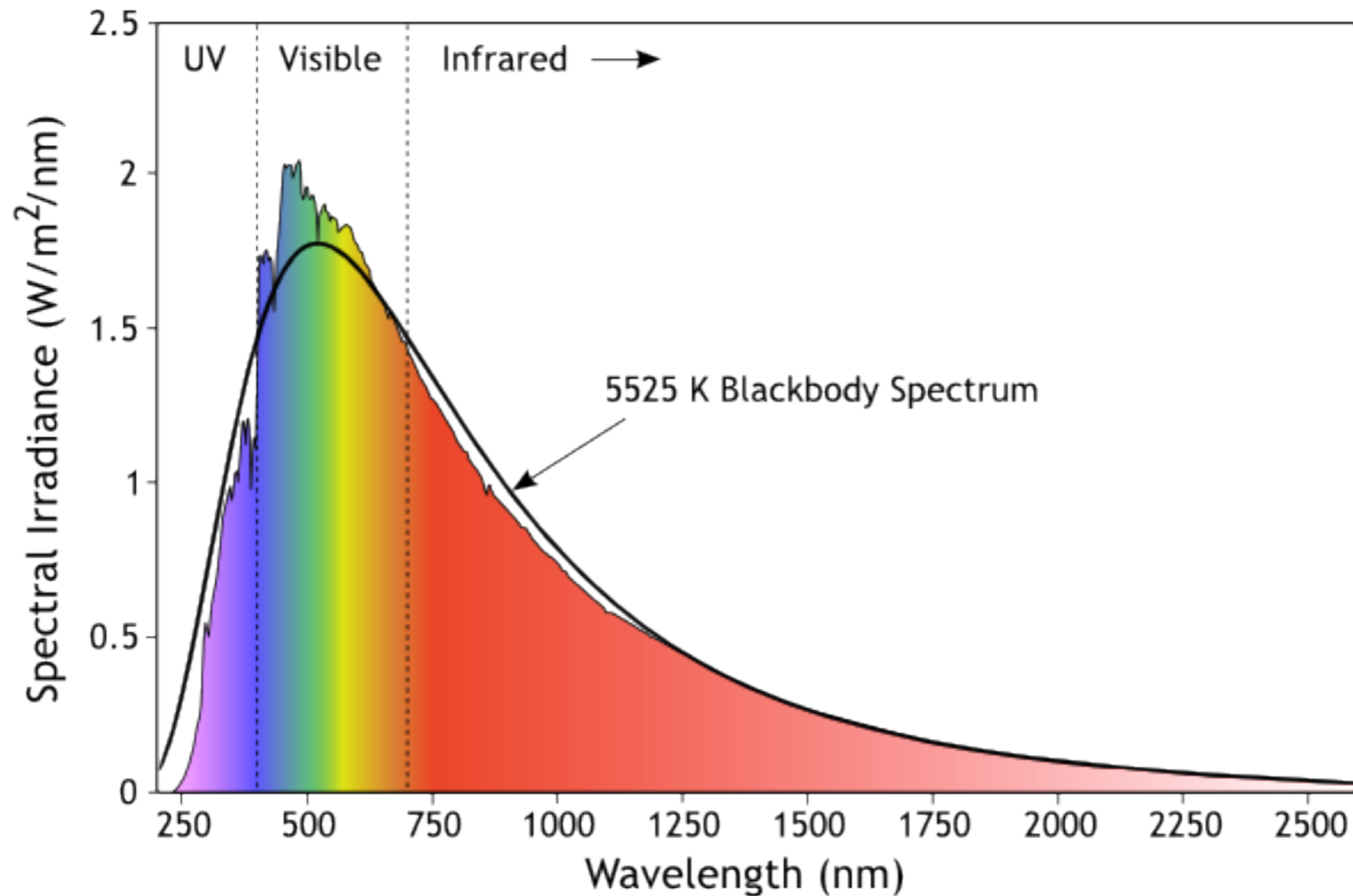
$$m - M = -5 + 5 \log d$$

$$m + 5 \log R + 10 \log T \sim -5 + 5 \log d$$

$$m \sim -5 - 10 \log T - 5 \log \left(\frac{R}{d} \right)$$

látni mérték + látni
mérték megadás a
luminositás!

Színképek: kontinuum + spektrumvonalak

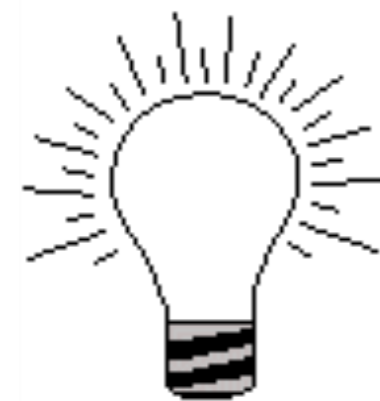




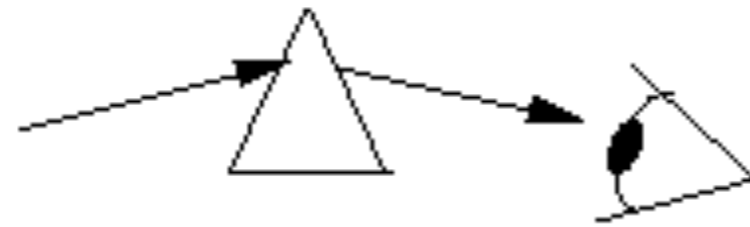
izzó szilárd test vagy
magasnyomású gáz



izzó alacsony nyomású gáz



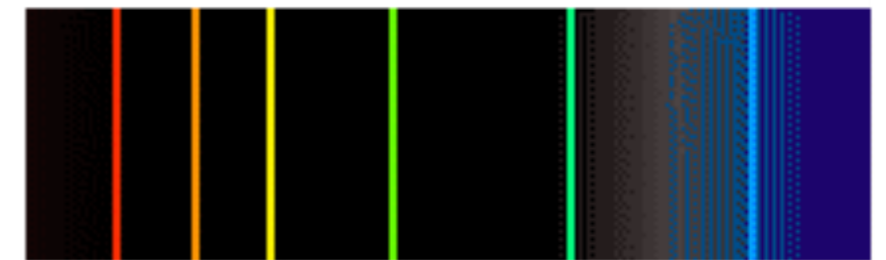
ritka hűvösebb gáz



folytonos spektrum



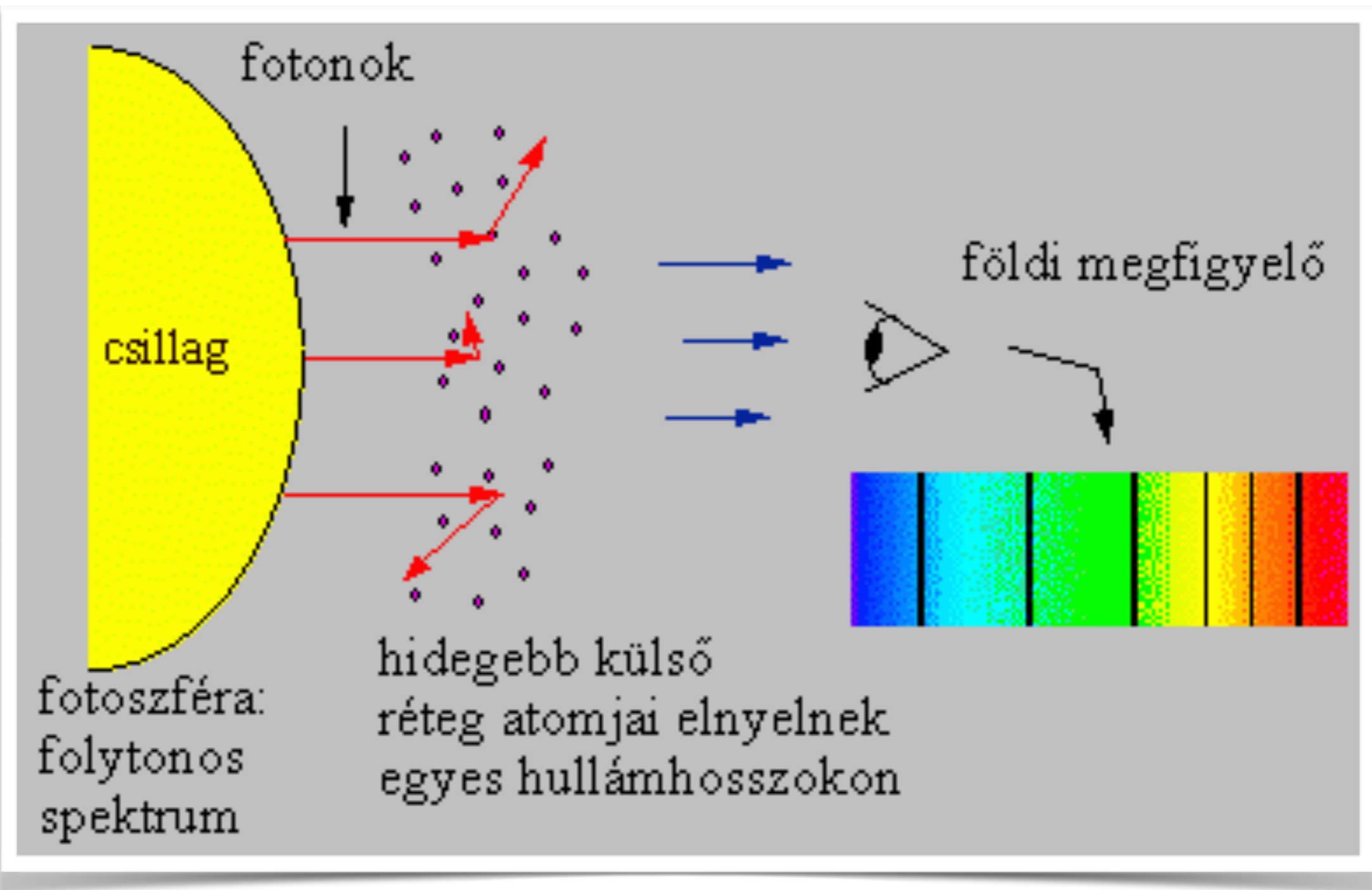
emissziós vonalas spektrum



abszorpciós vonalas spektrum

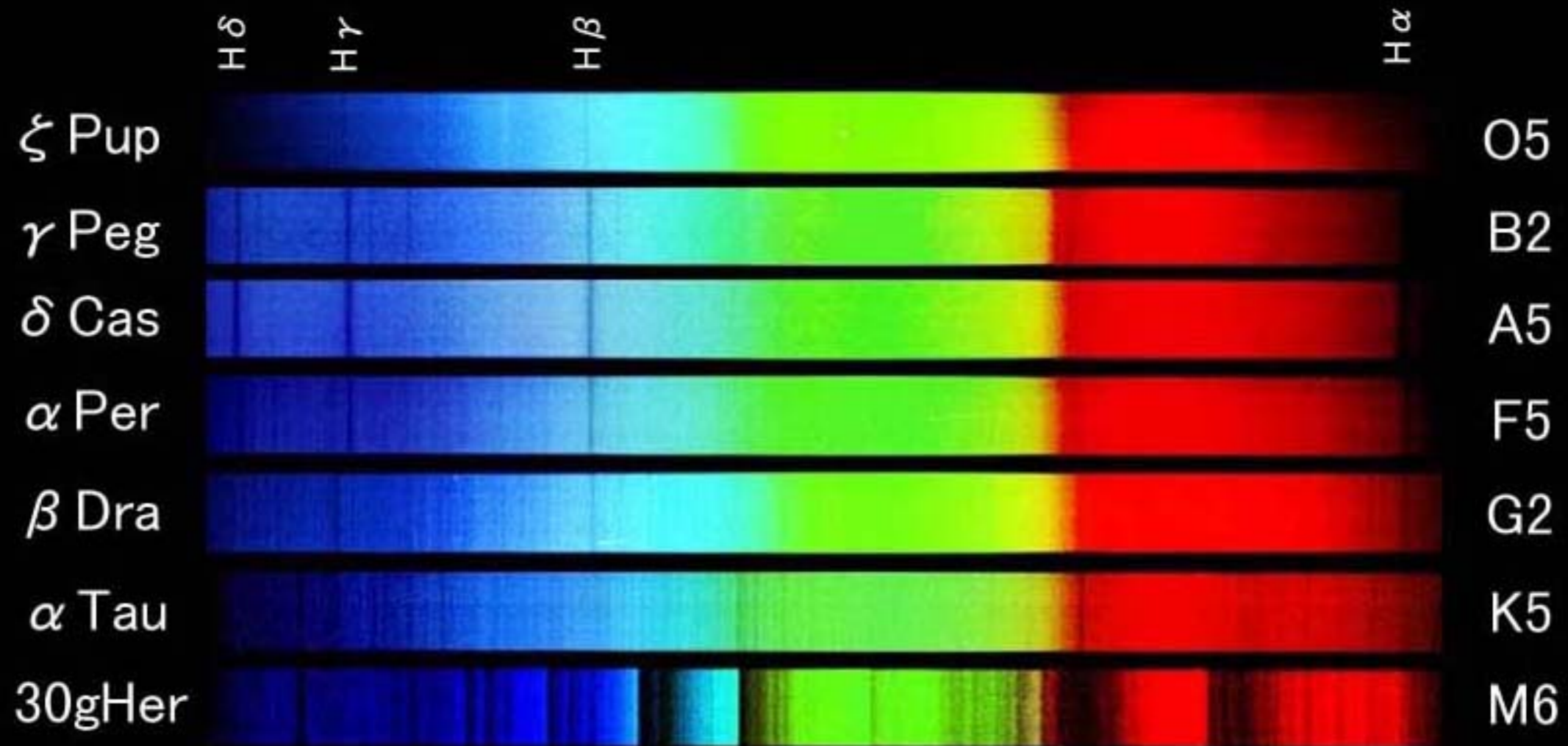


(Meteor Csill. Évk. 1998)

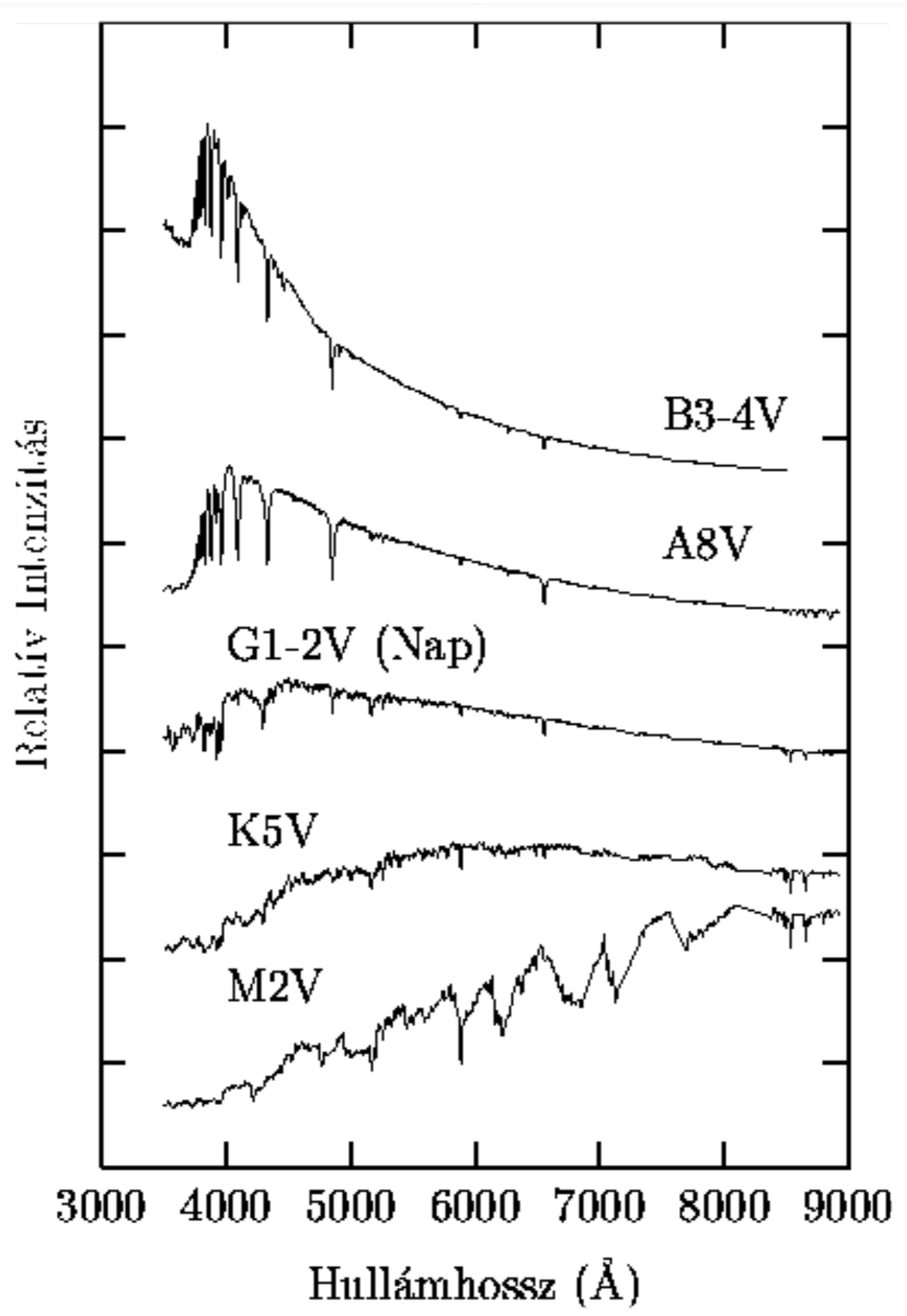


(Meteor Csill. Évk. 1998)

Color Spectral Images

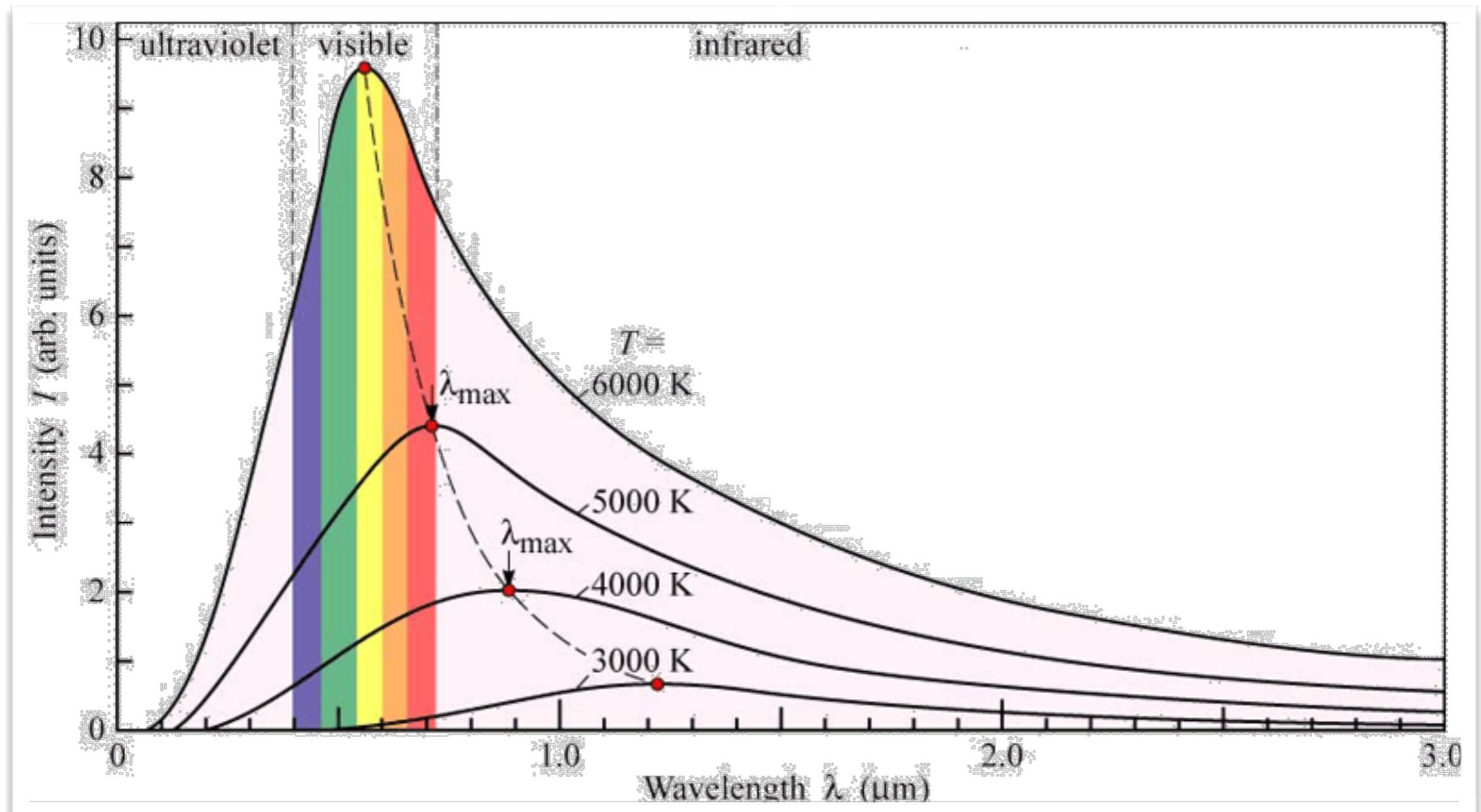


Okayama Astrophysical Observatory / NAOJ



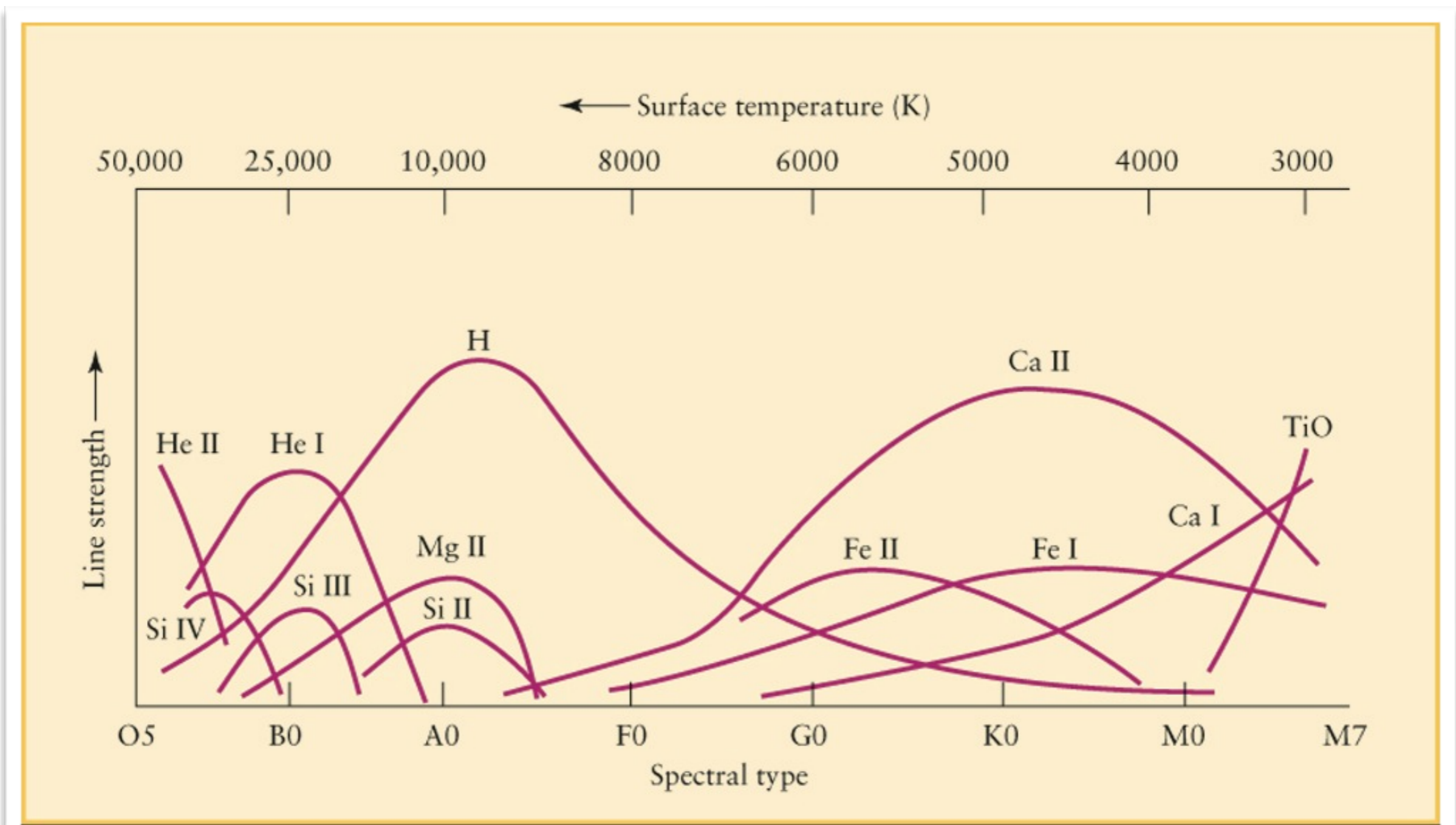
(Meteor Csill. Évk.
1998)

Folytonos színekép: hőmérséklet



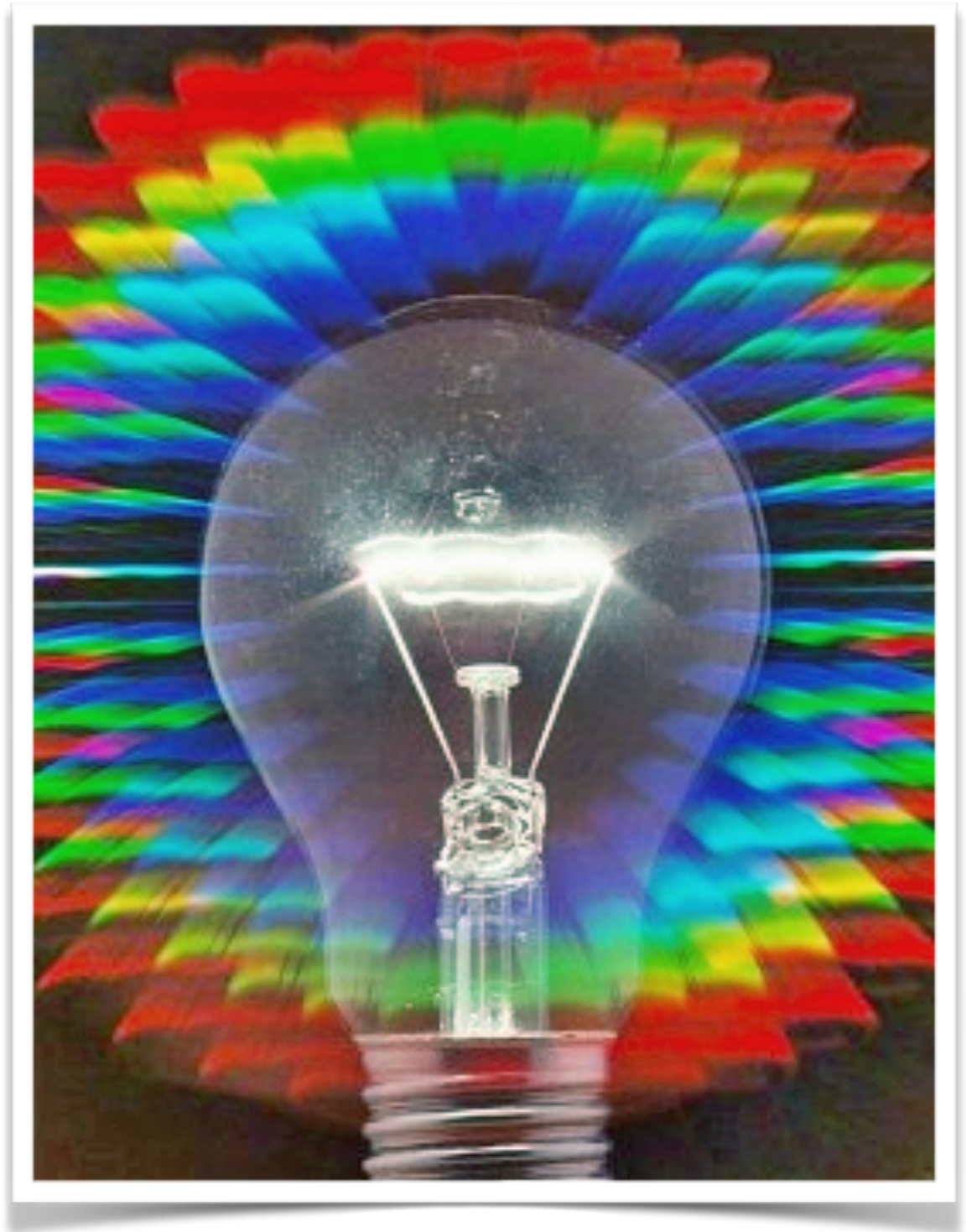
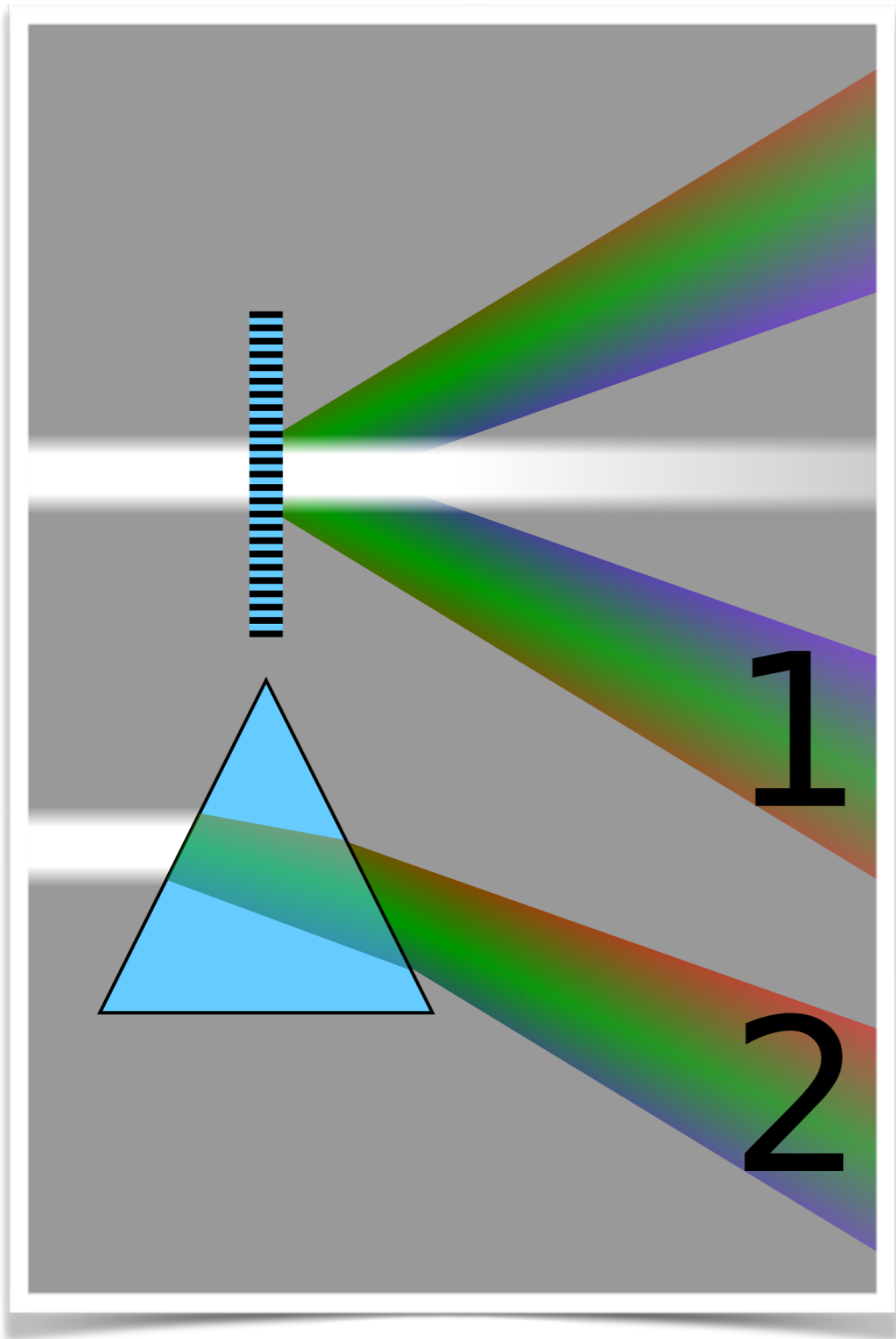
(Univ. of Oregon)

Vonalas színkép: hőmérséklet!



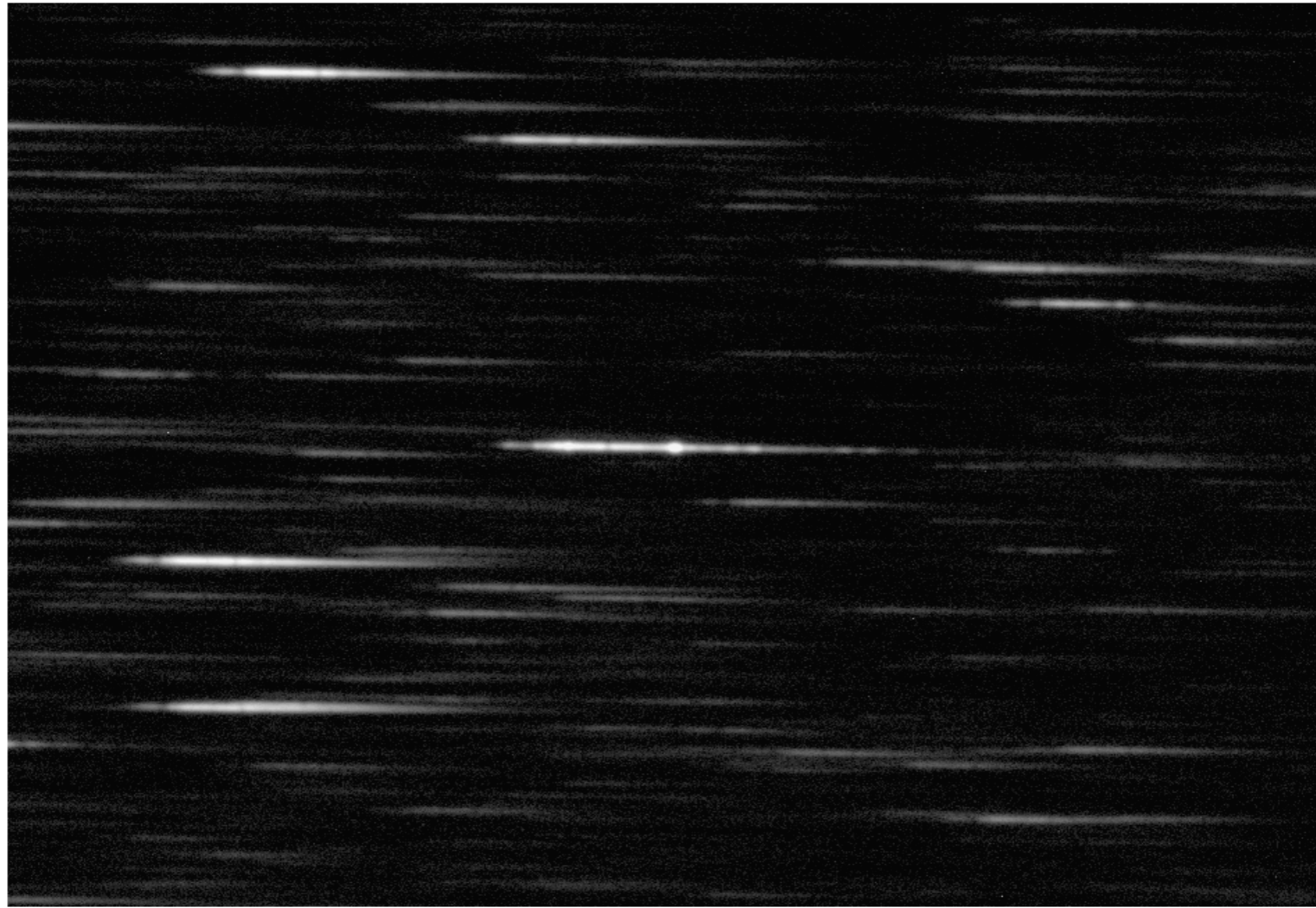
(Univ. of Alberta)

Bontsuk fel a fényt!



(Wikipedia)



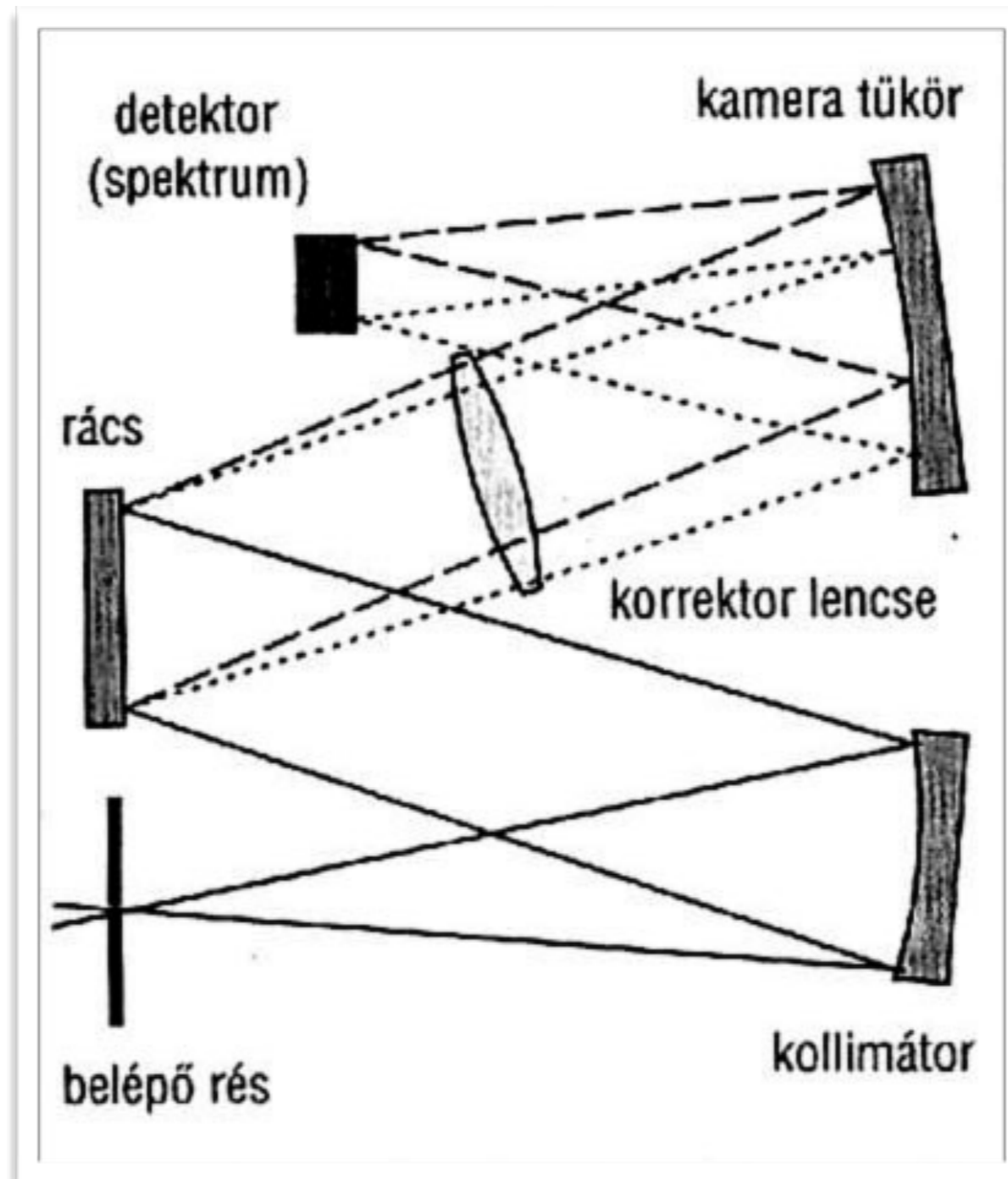


*Mûszer: 60/90/180 Schmidt
+ Photometrics AT200 CCD
LM= 29x18'*

szûrõ nélkül

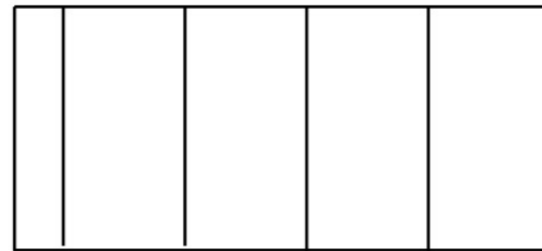
spektrum c.c. 600 pixel (max.)

Spektrográf alapelemei



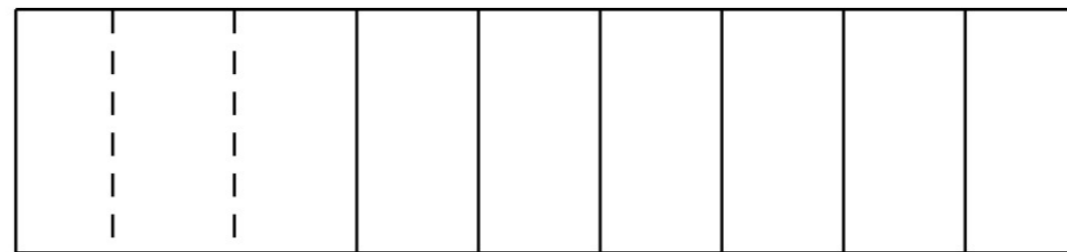
(Fűrész 2002)

1st
order



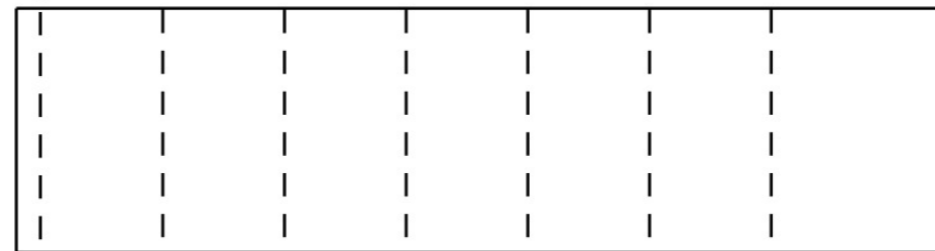
4000Å 6000Å 8000Å 10000Å

2nd
order



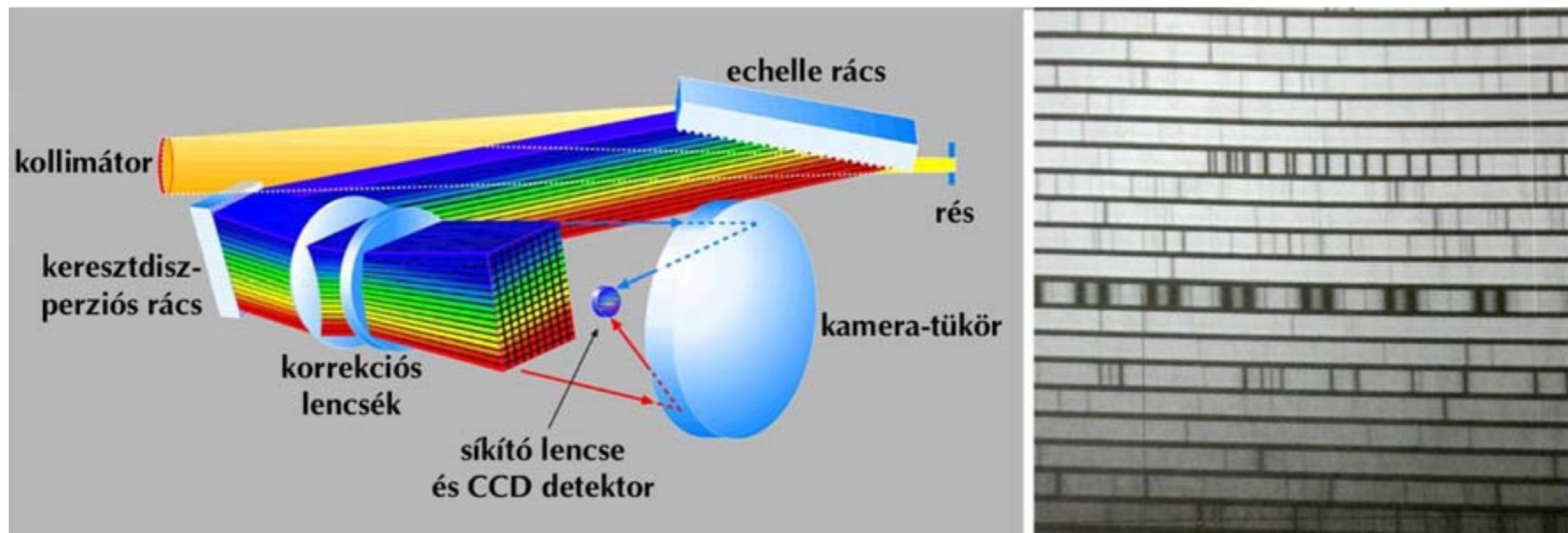
4000Å 5000Å 6000Å 7000Å 8000Å 9000Å 10000Å 11000Å

3rd
order



3333Å 4000Å 4667Å 5333Å 6000Å 6666Å 7333Å

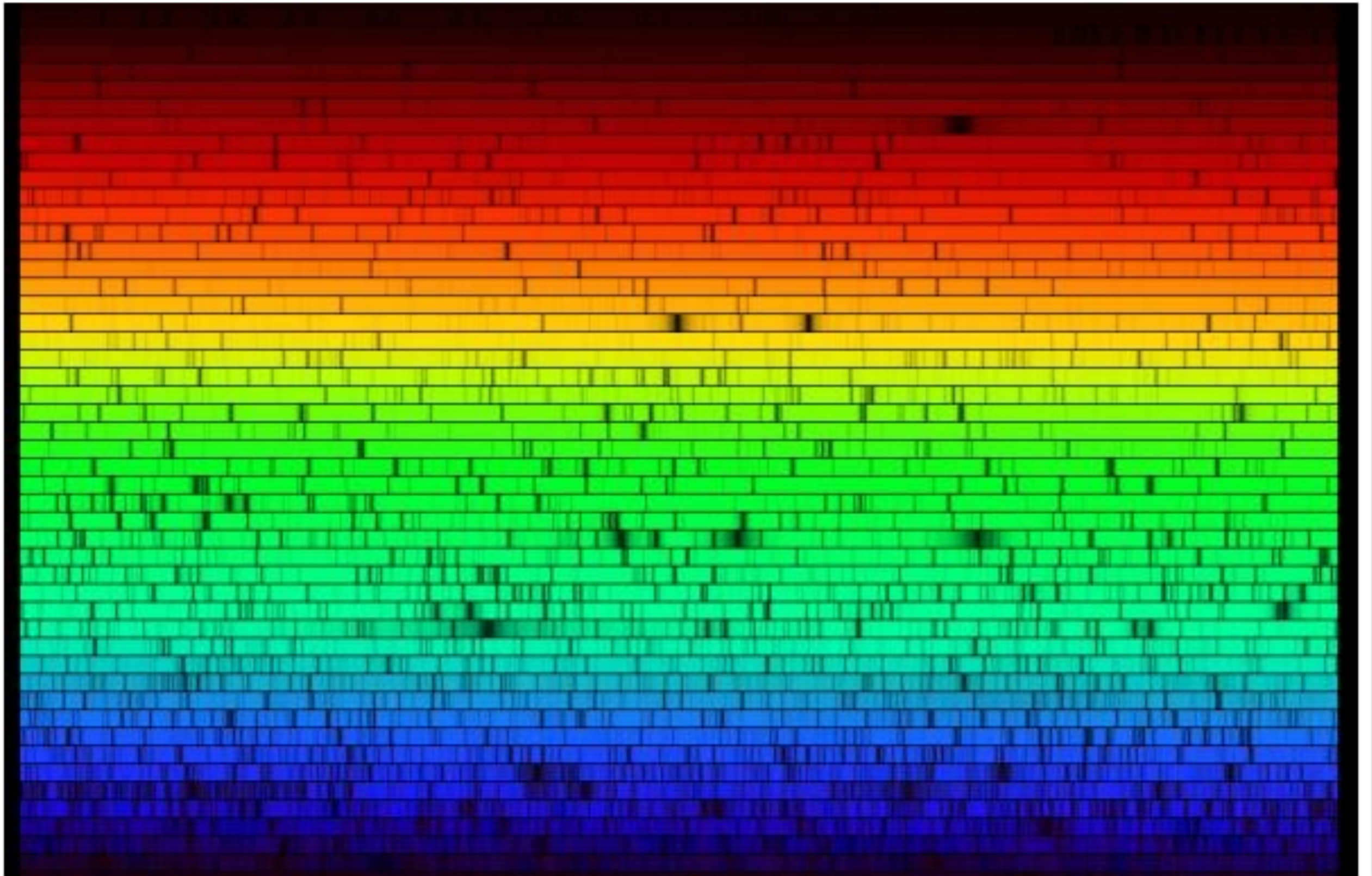
(Massey & Hanson 2011)

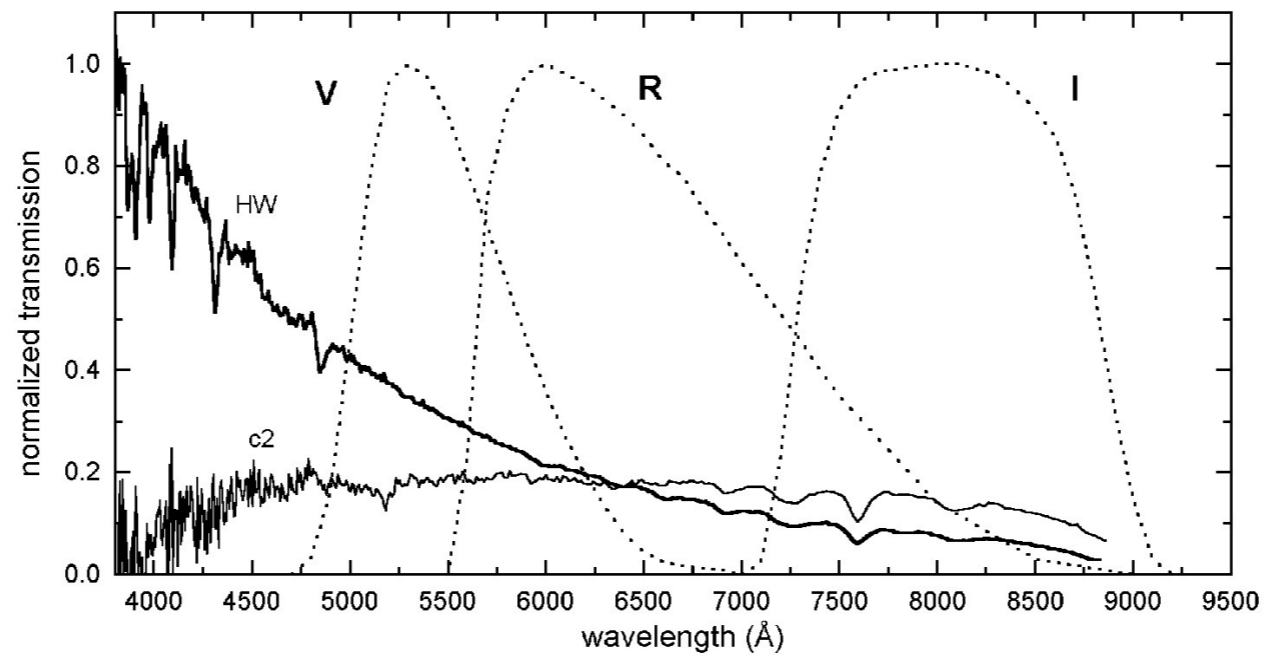
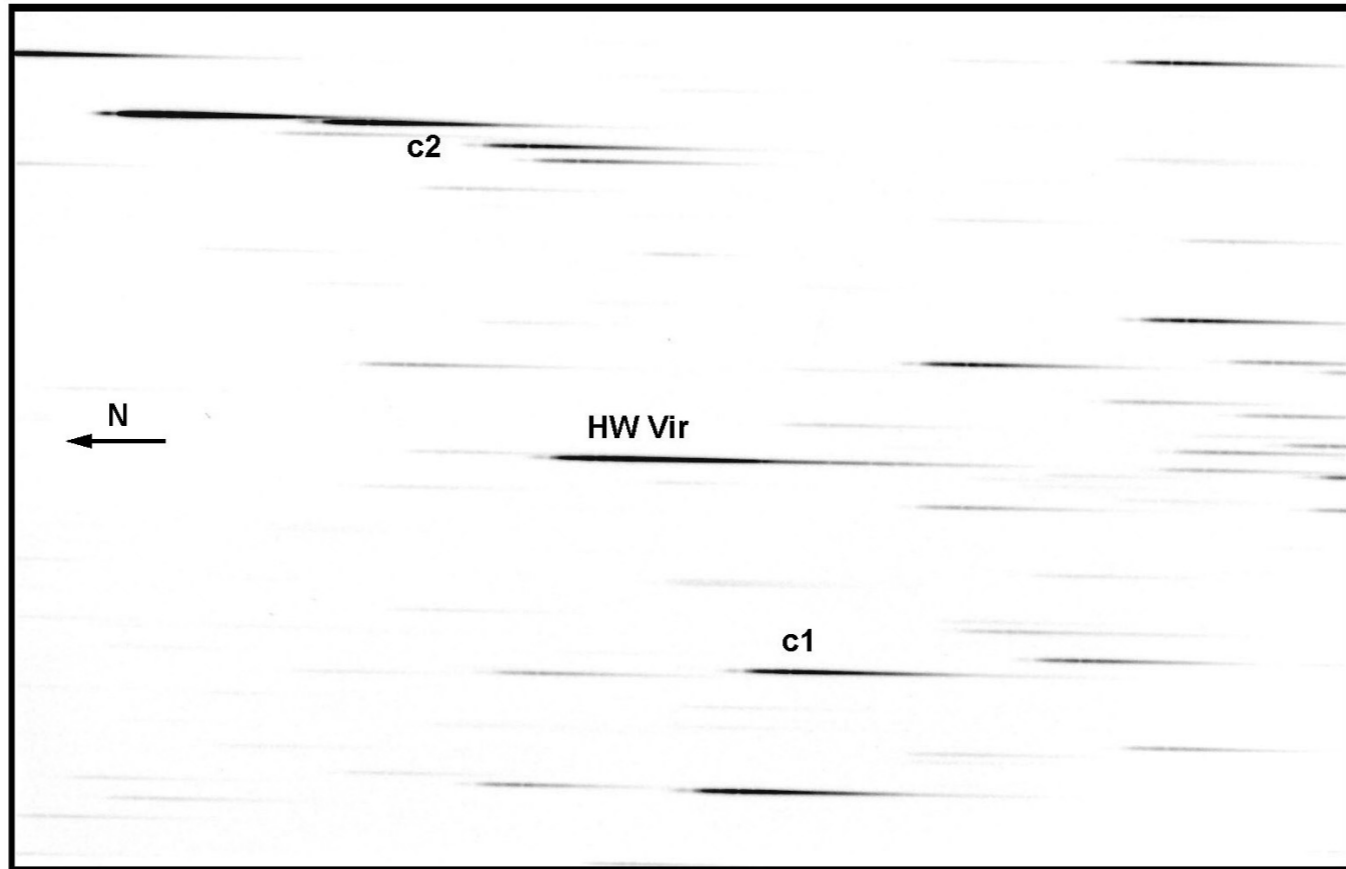


8. ábra.
Echelle spektrográf felépítése és egy echelle spektrum

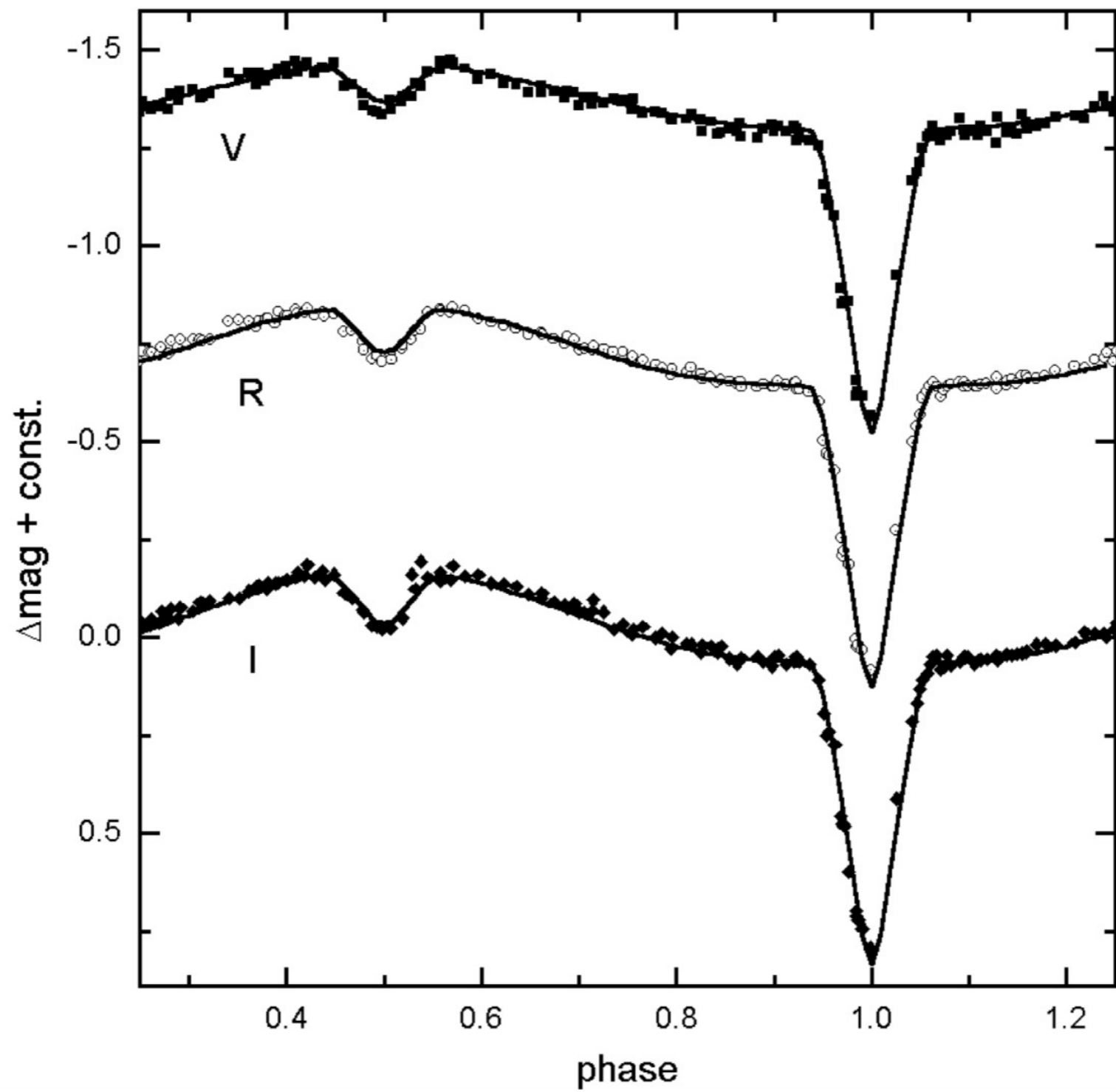
(Fűrész 2002)

A Nap echelle spektruma

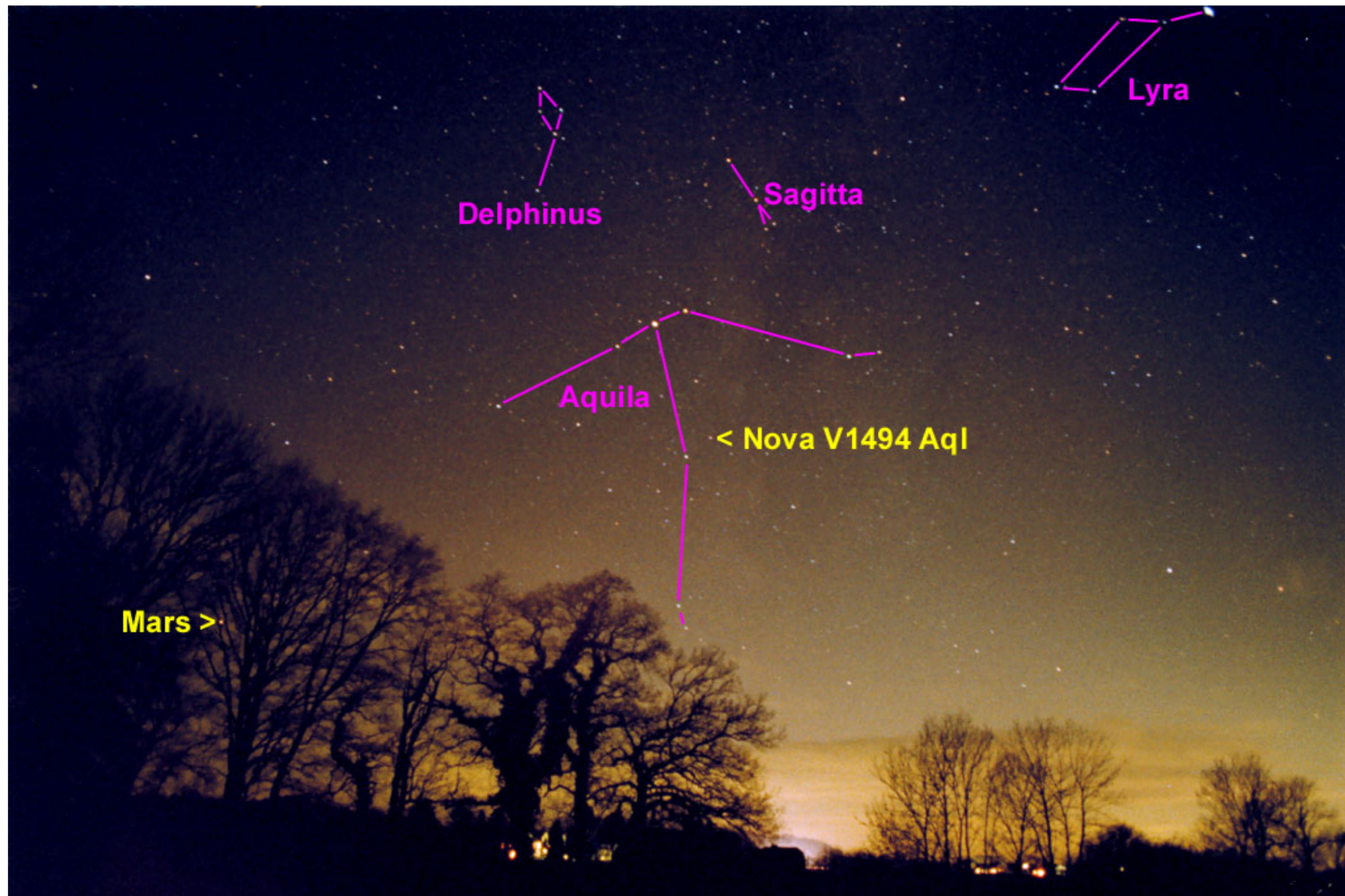




HW Vir



Tranziens égi objektumok

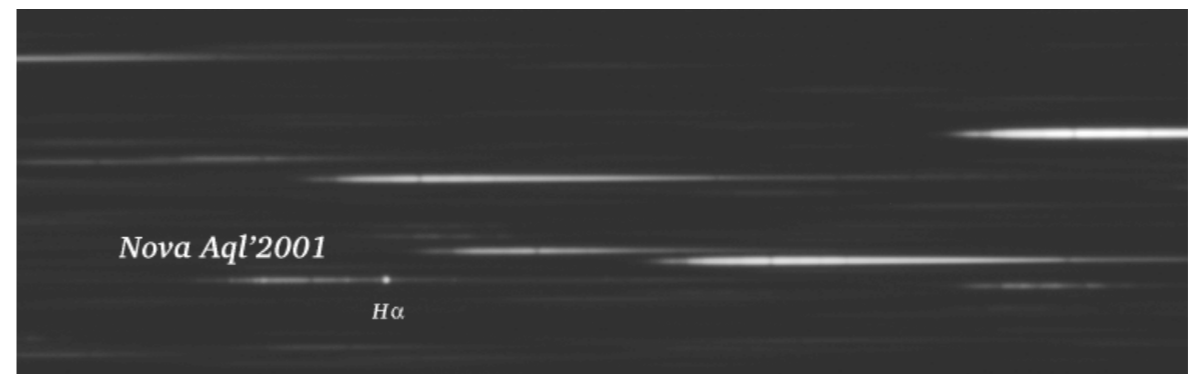
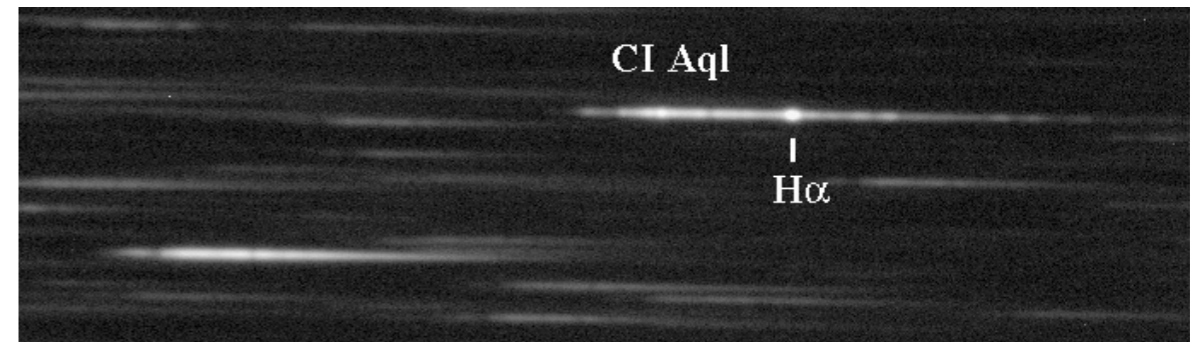


(APOD)

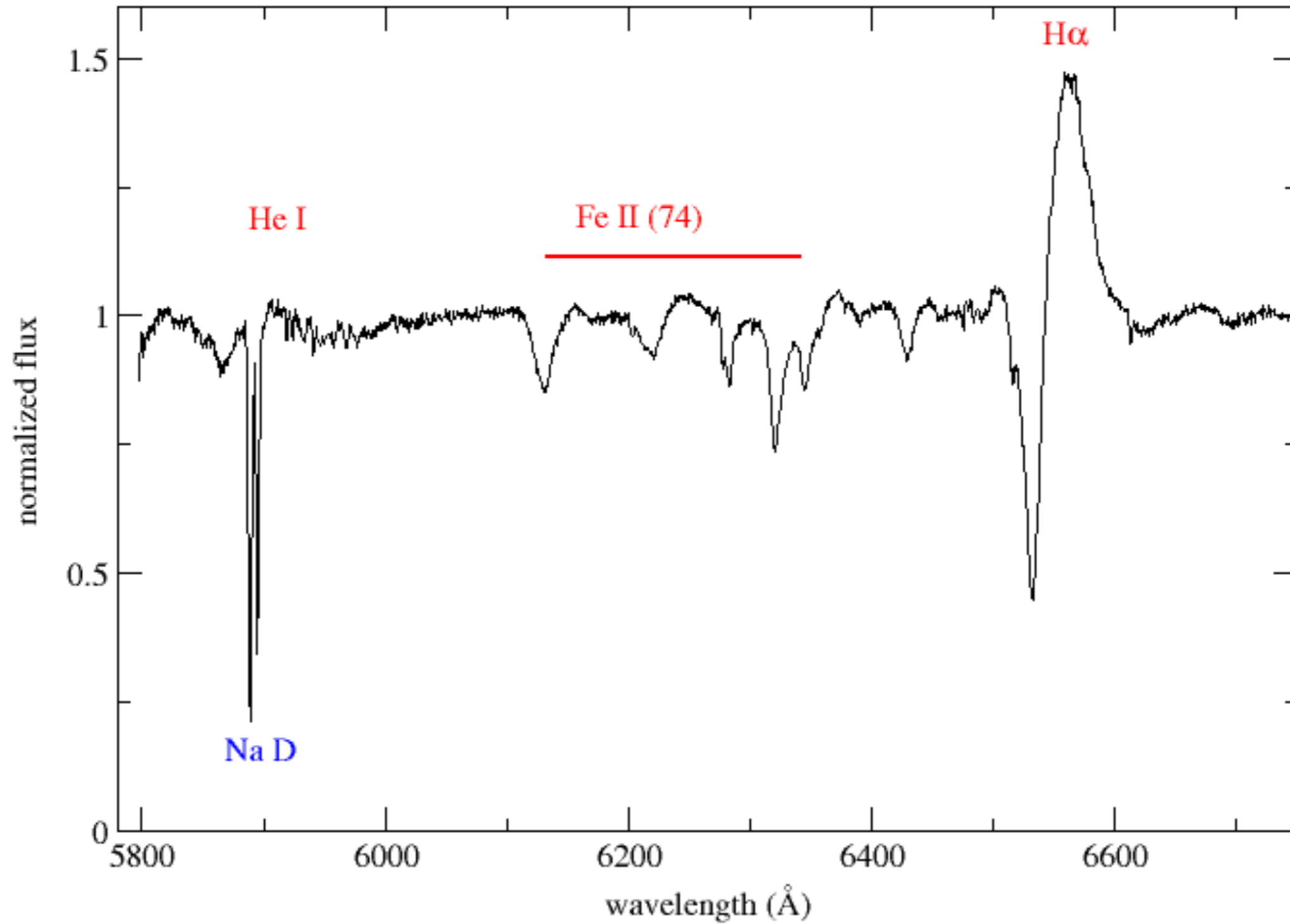
Első spektroszkópai feladat: megerősítés

Egyetlen színekép elárulja a különbséget

- Törpe nóva?
H vonalak abszorpcióban
(optikailag vastag akkréciós korong)
- Nóva?
H, He, Fe, ... vonalak
emisszióban (ledobódott forró gázfelhő)
- (Ia) szupernóva?
Nincsenek H vonalak, néhány széles abszorpciós gödör

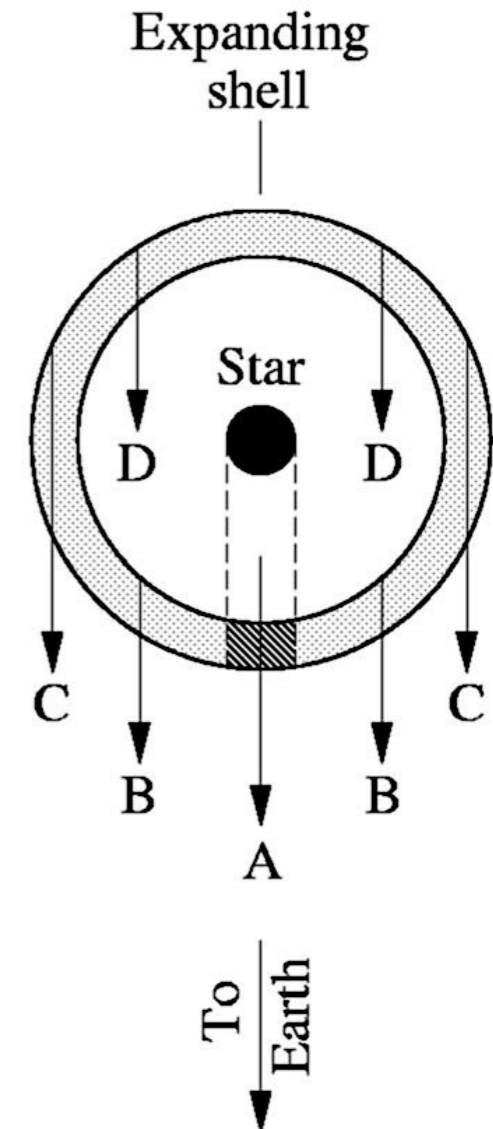
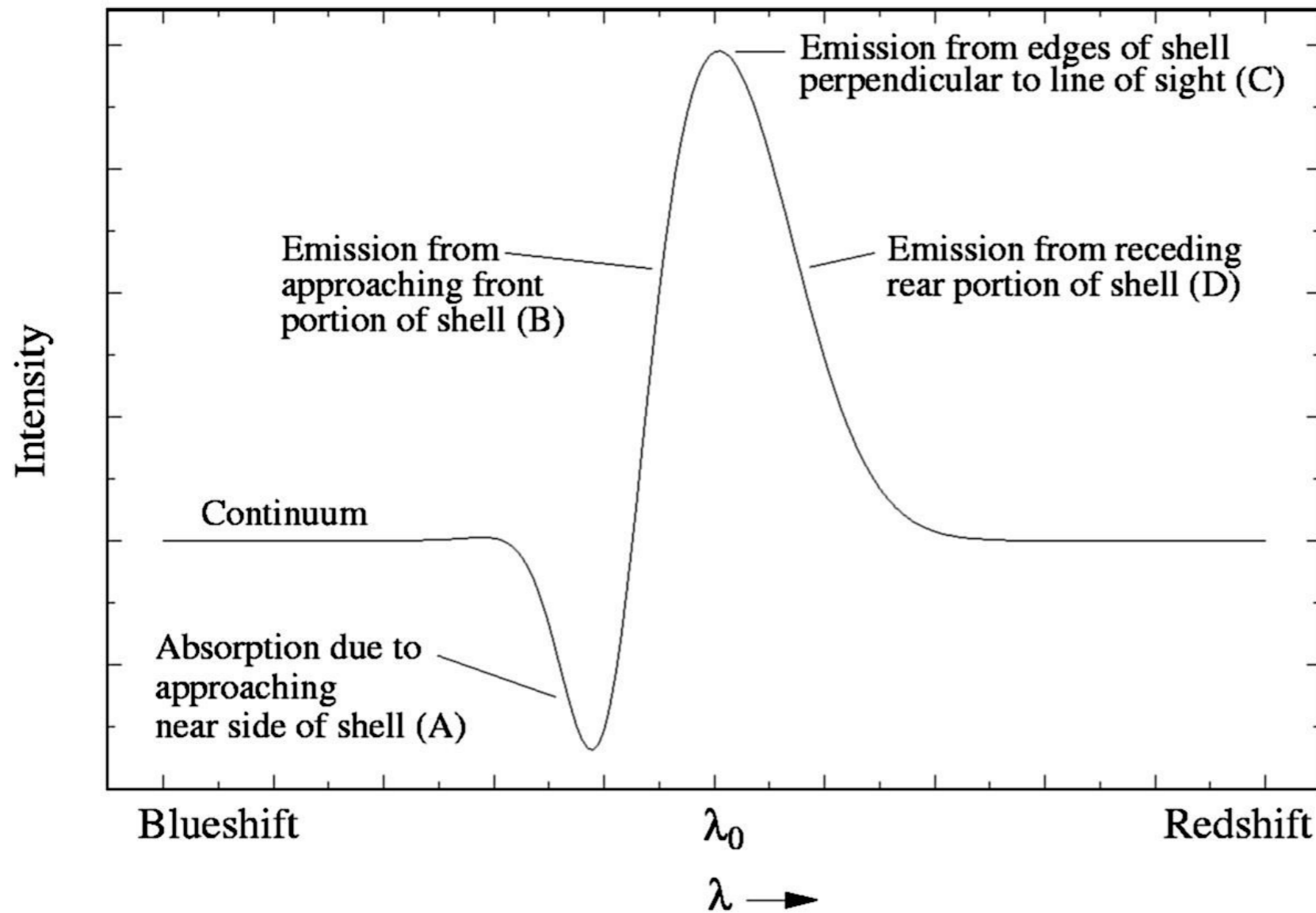


Nova Sgr 2005



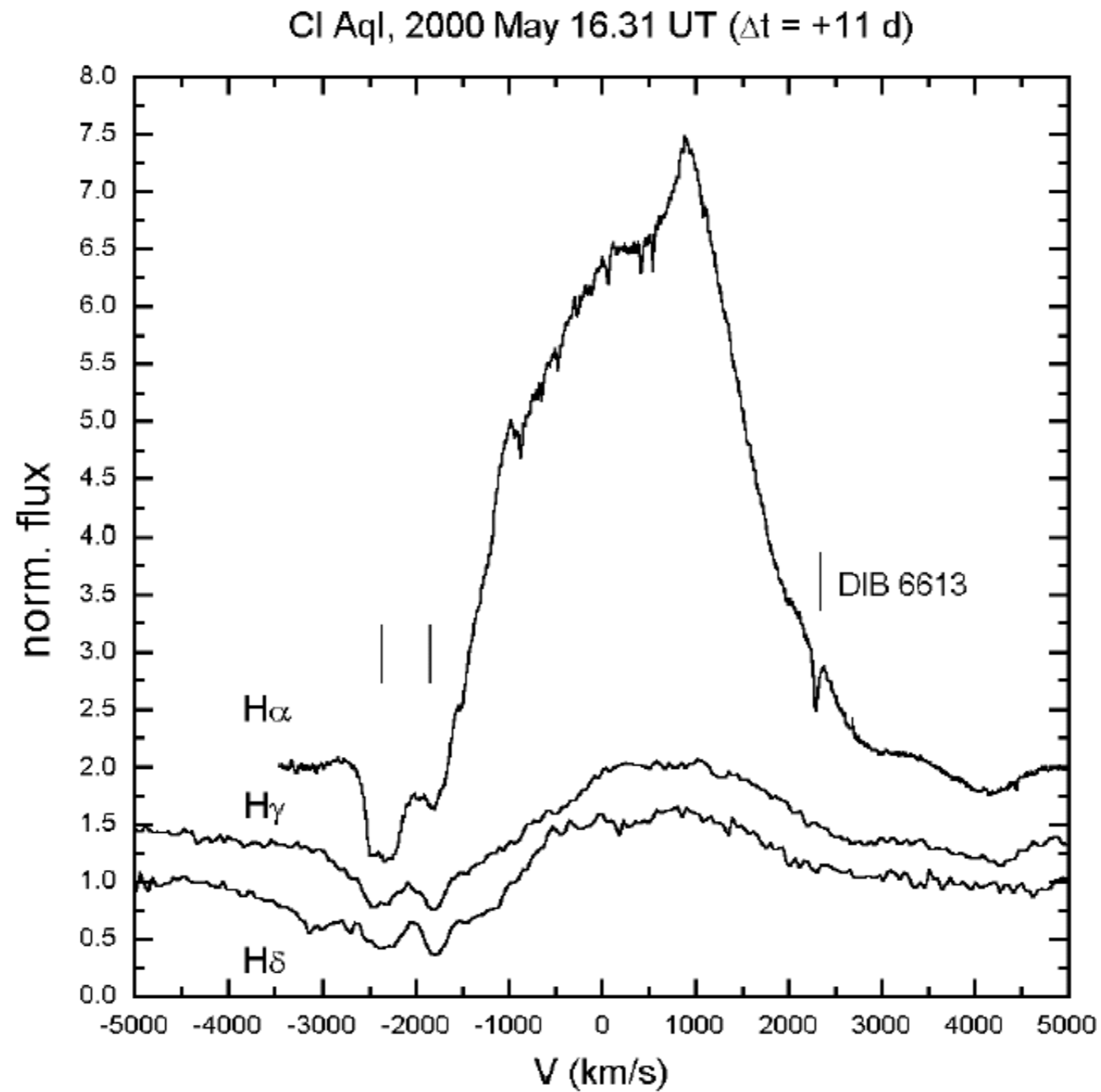
(Kiss & Derekas, 2005, IAUC 8501)

A táguló gázfelhő kinematikája: a P Cygni vonalprofil



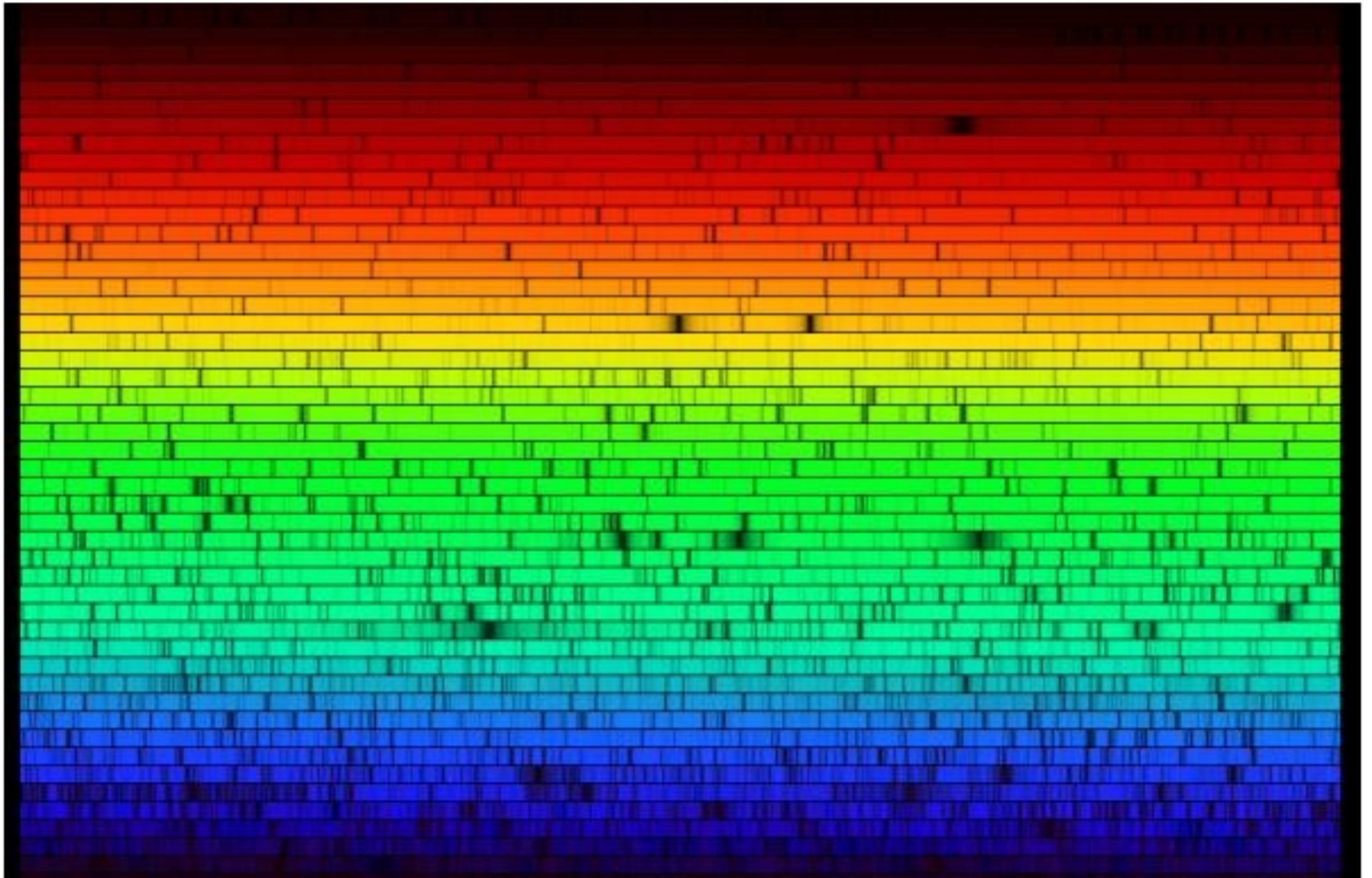
(Carroll & Ostlie 1996)

CI Aql (Nova Aql 1917 and 2000)

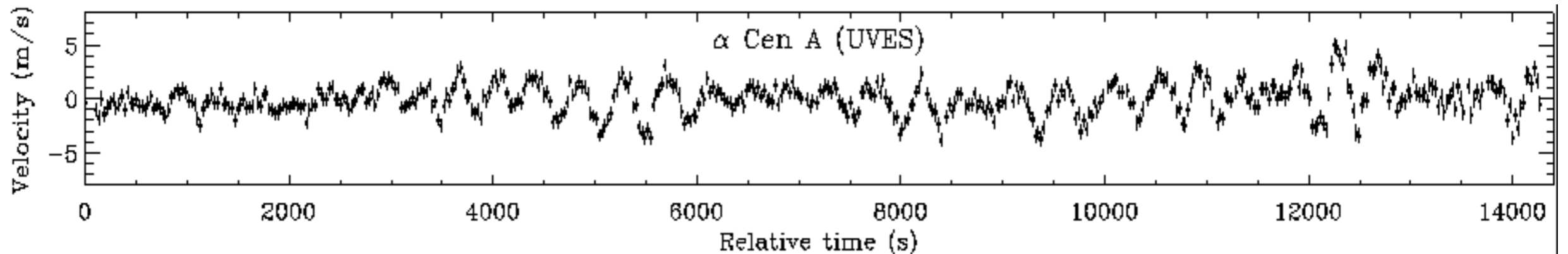


(Kiss et al. 2001, A&A, 366, 858)

Színképvonalak - kozmikus traffipax



Az alfa Cen A az UVES/MLT műszerrel

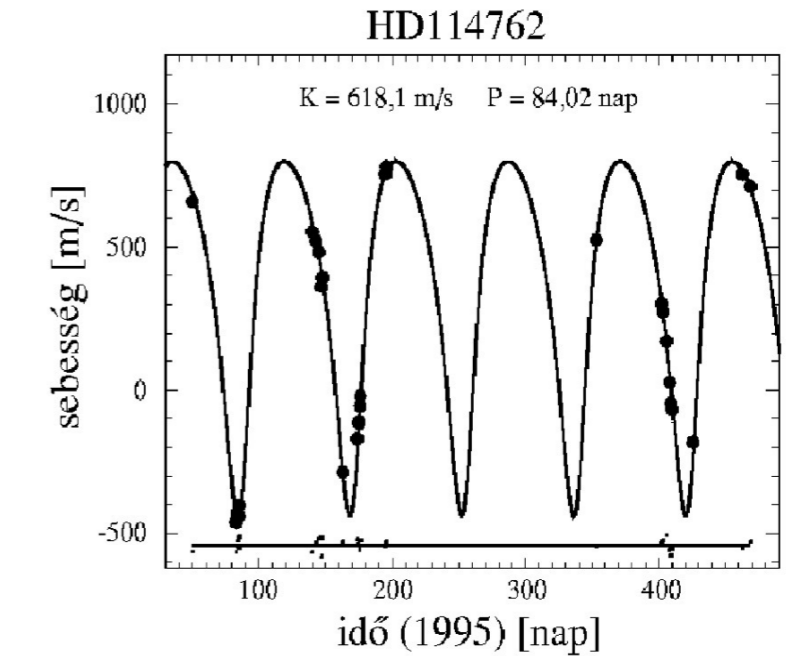
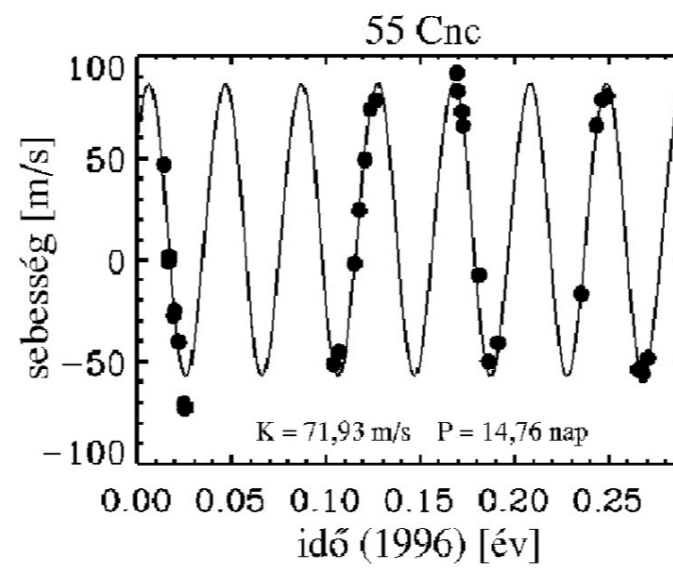
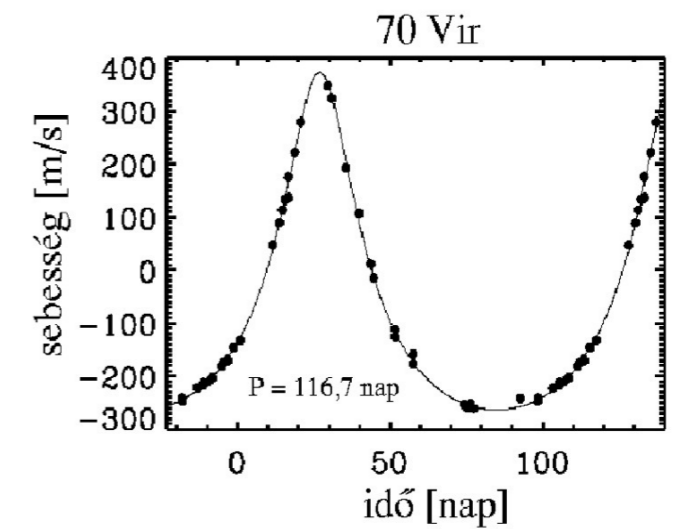
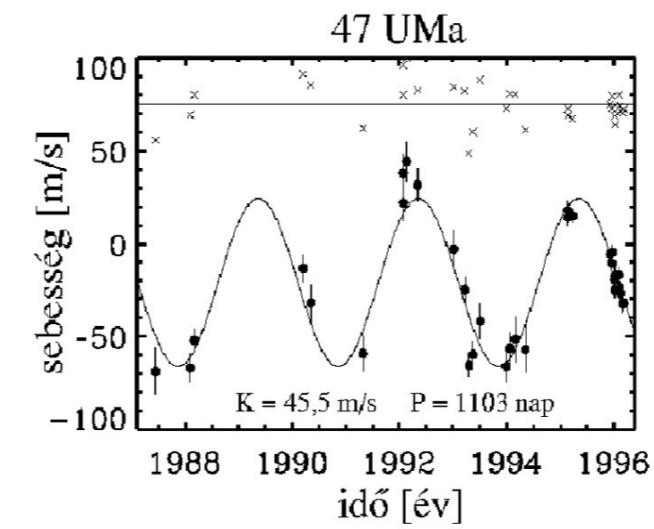
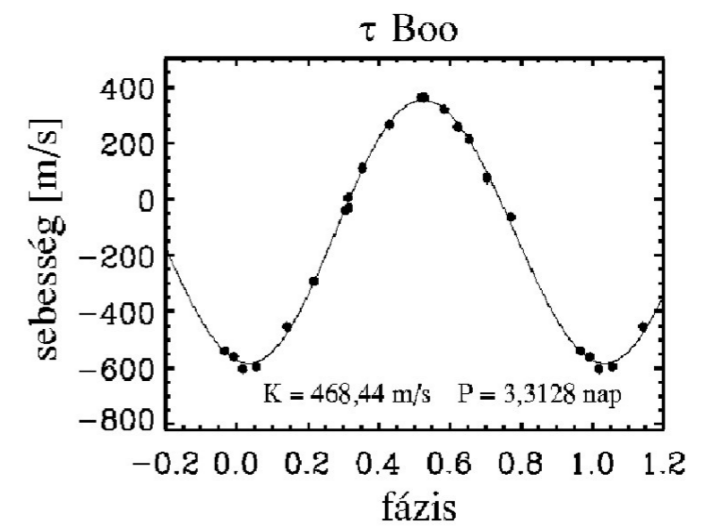
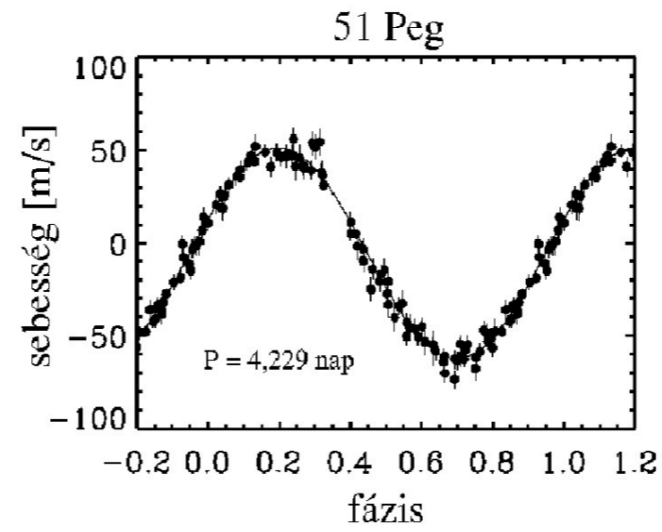
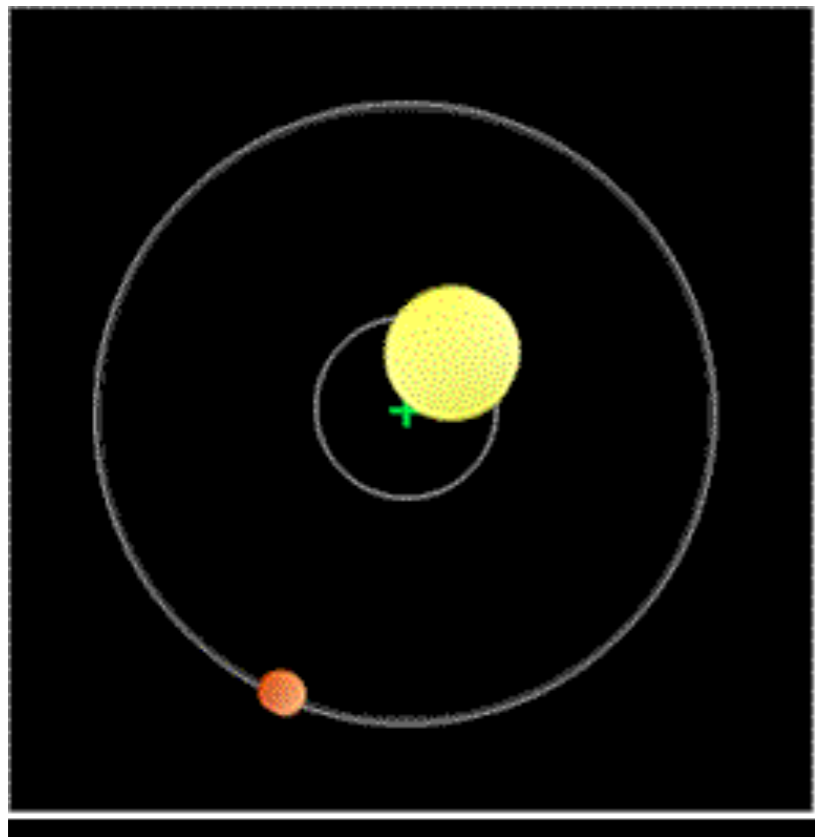
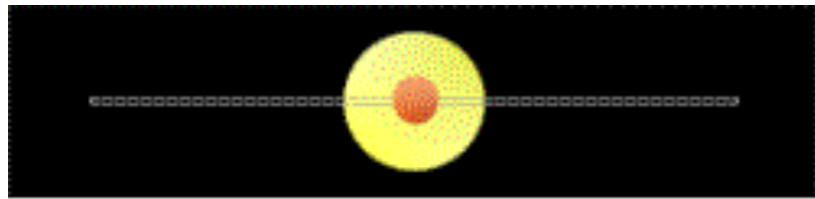


Pontosság: 50-70 cm/s. 3 s expozíciók, 8m-es távcső, a déli ég 3. legfényesebb csillaga

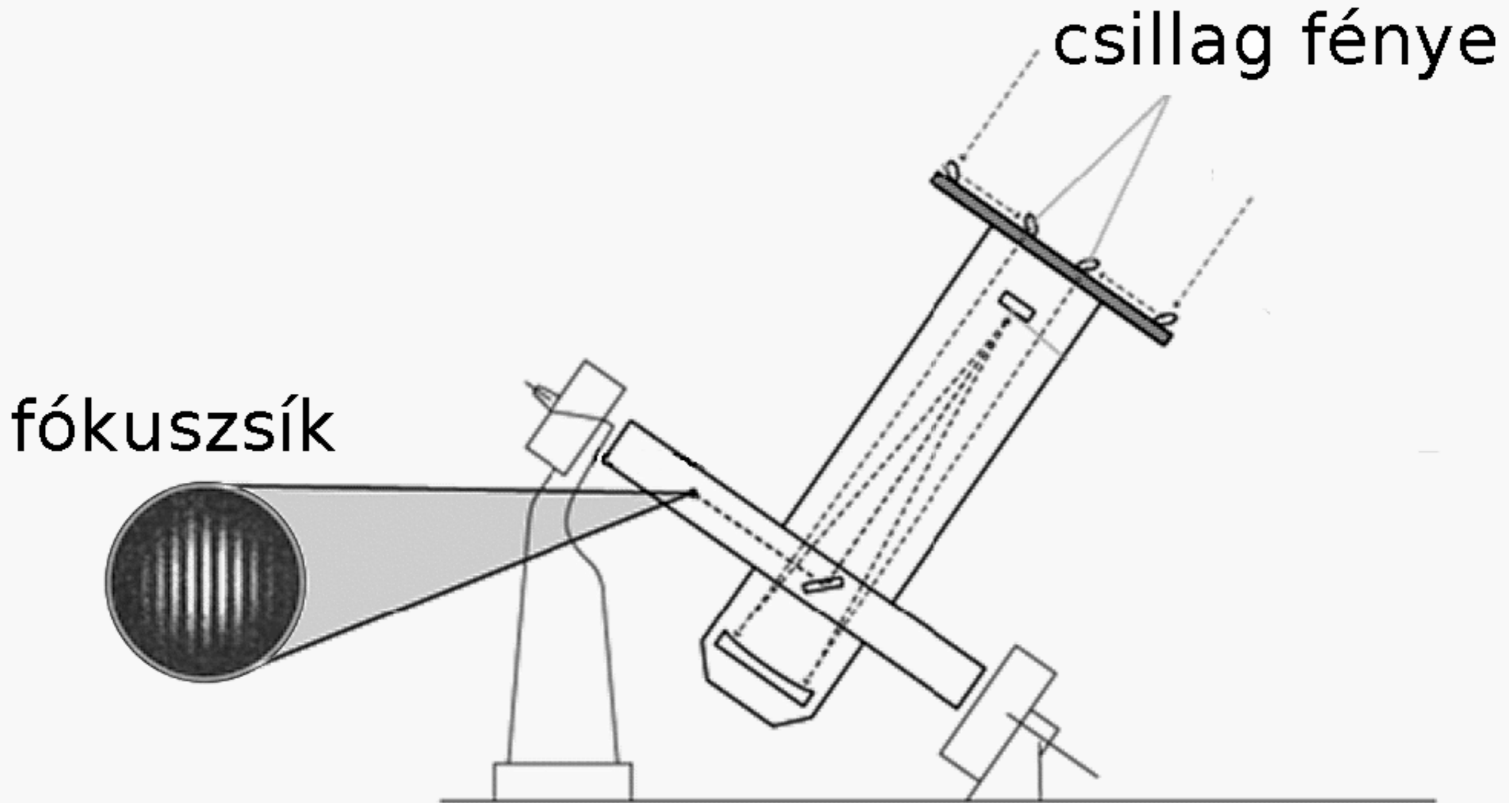
Butler et al. (2003)

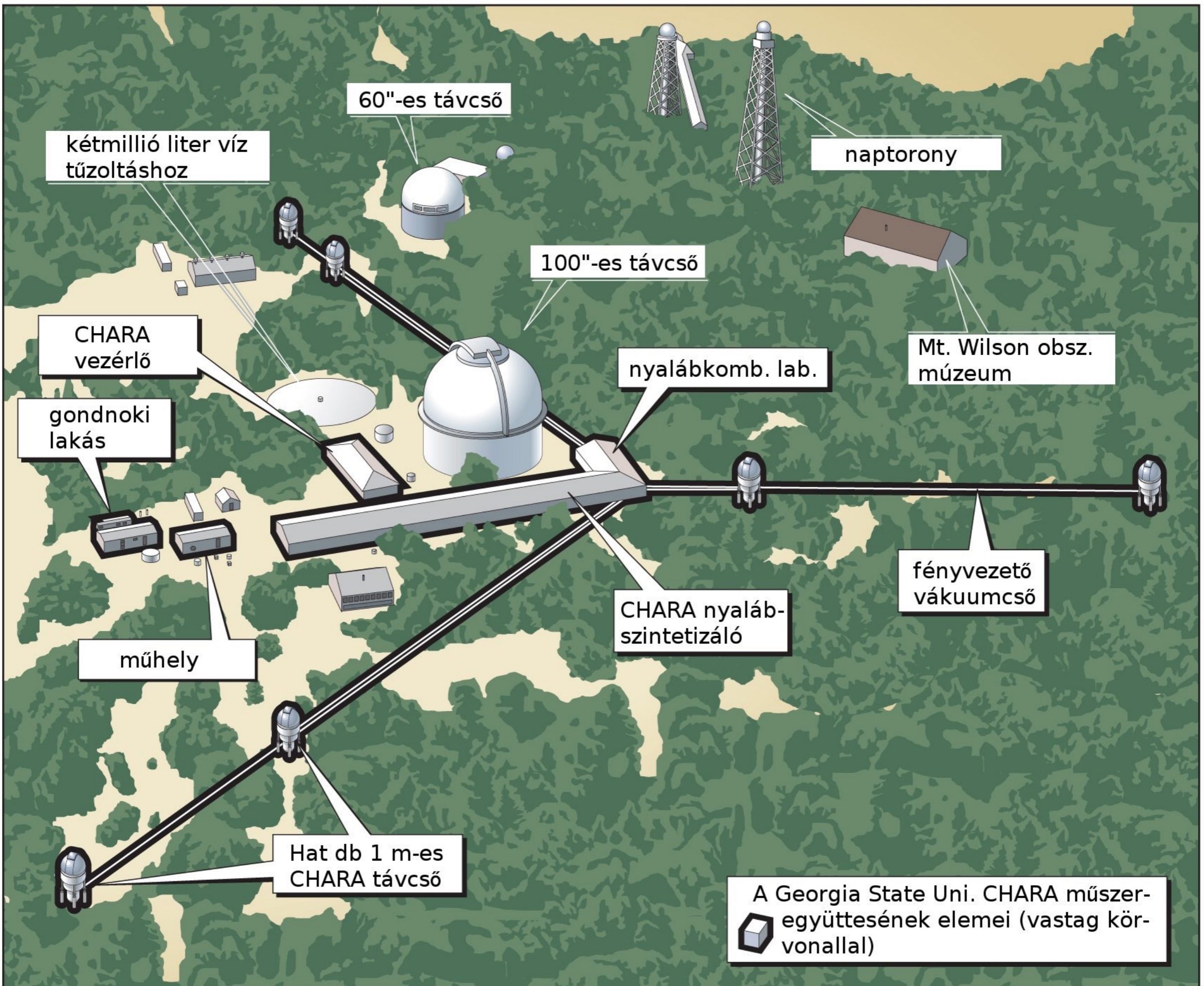
Pontosság: 10-50 cm/s. 10-20 perc expozíciók, 1-4m-es távcsövek, szabad szemmel látszó csillagok (kb. 6000)

Néhány csoport (2014)



Interferometria: csillagkorongok felbontása





UT1 (Antu)

CRIRES
FORS2
KMOS (2013)

UT2 (Kueyen)

FLAMES
X-SHOOTER
UVES

UT3 (Melipal)

ISAAC
VISIR
VIMOS
SPHERE (2013)

UT4 (Yepun)

AOF (2015)
HAWK-I
SINFONI
NACO
MUSE (2014)

VST

OmegaCAM

LGS

VISTA

VIRCAM

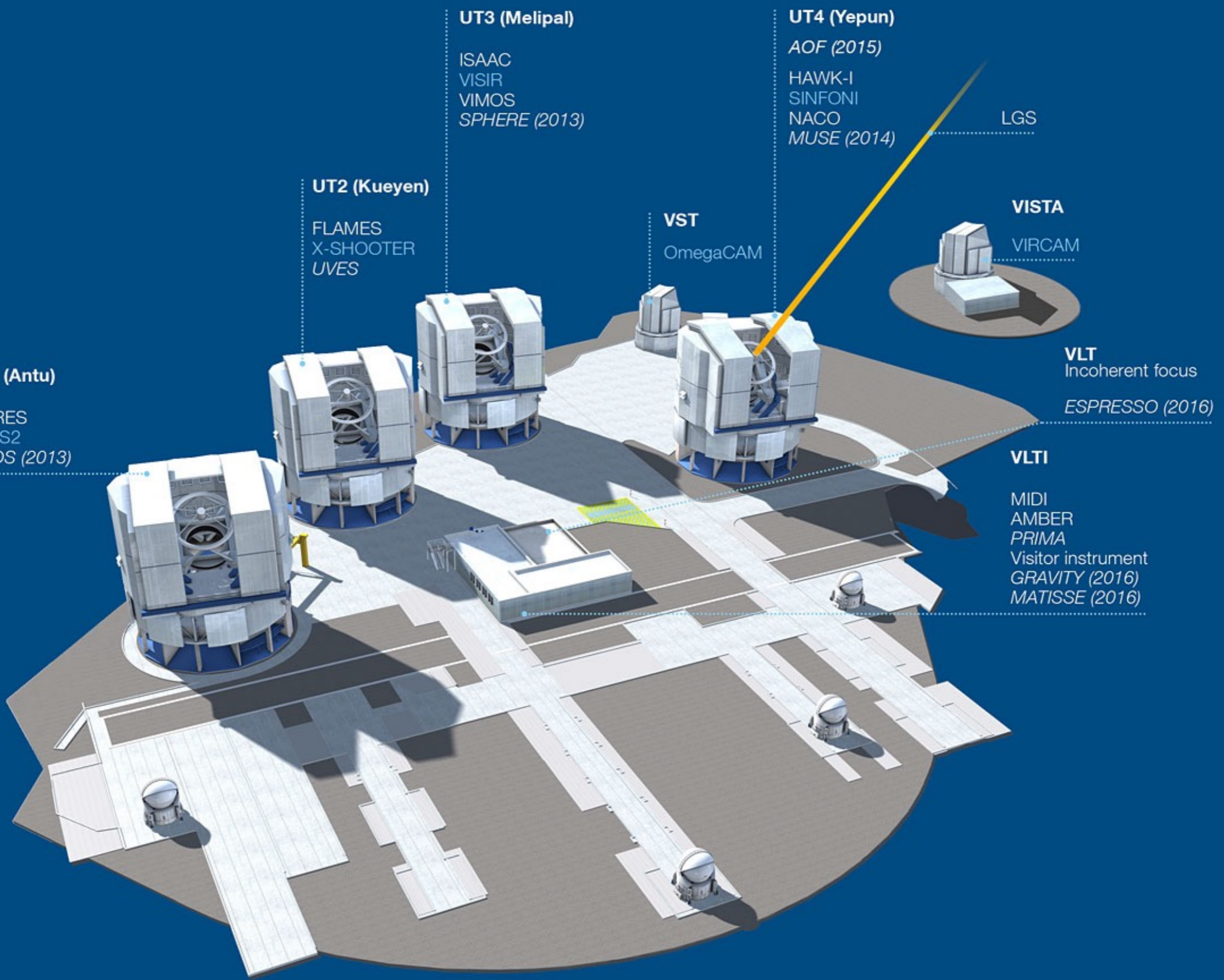
VLT

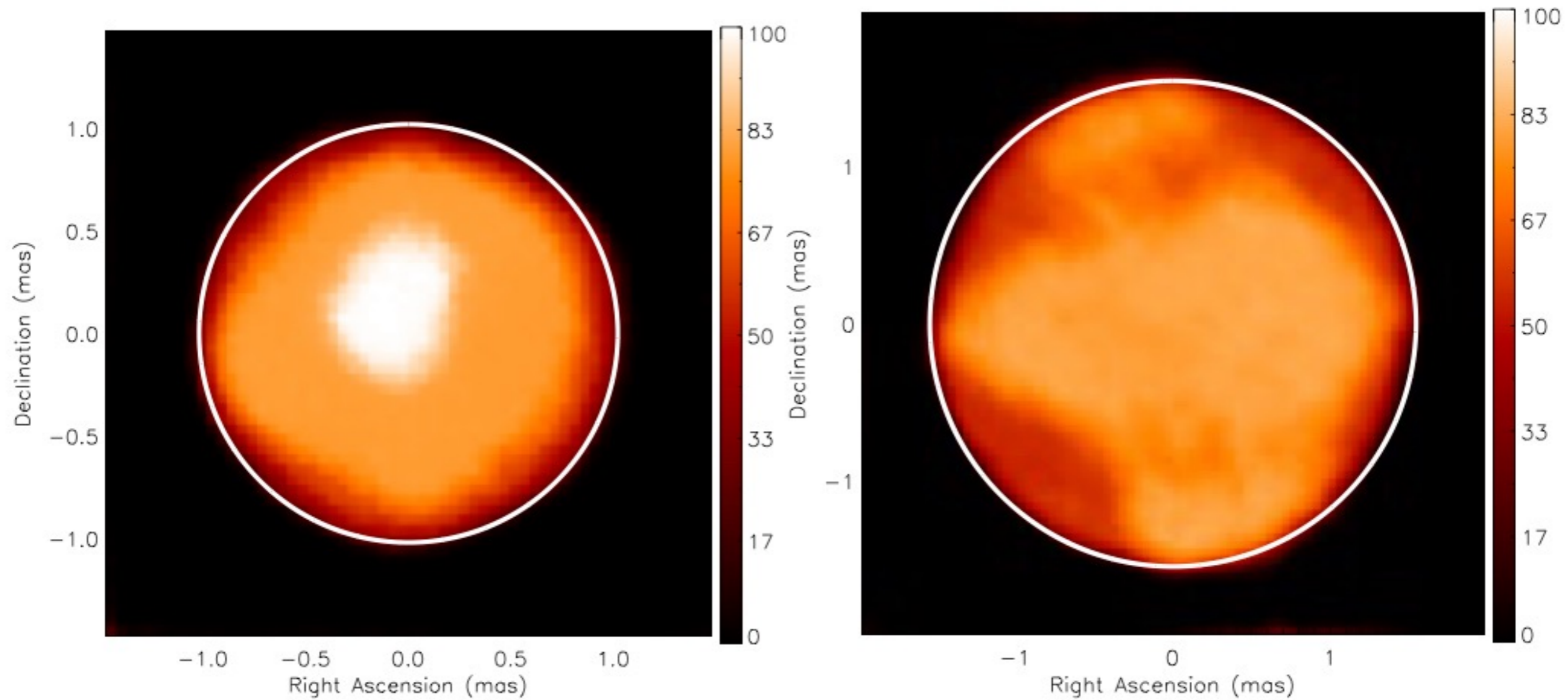
Incoherent focus

ESPRESSO (2016)

VLTI

MIDI
AMBER
PRIMA
Visitor instrument
GRAVITY (2016)
MATISSE (2016)





<http://www.matud.iif.hu/2015/10/03.htm>

A csillagok természetete, HRD, távolságmodulus

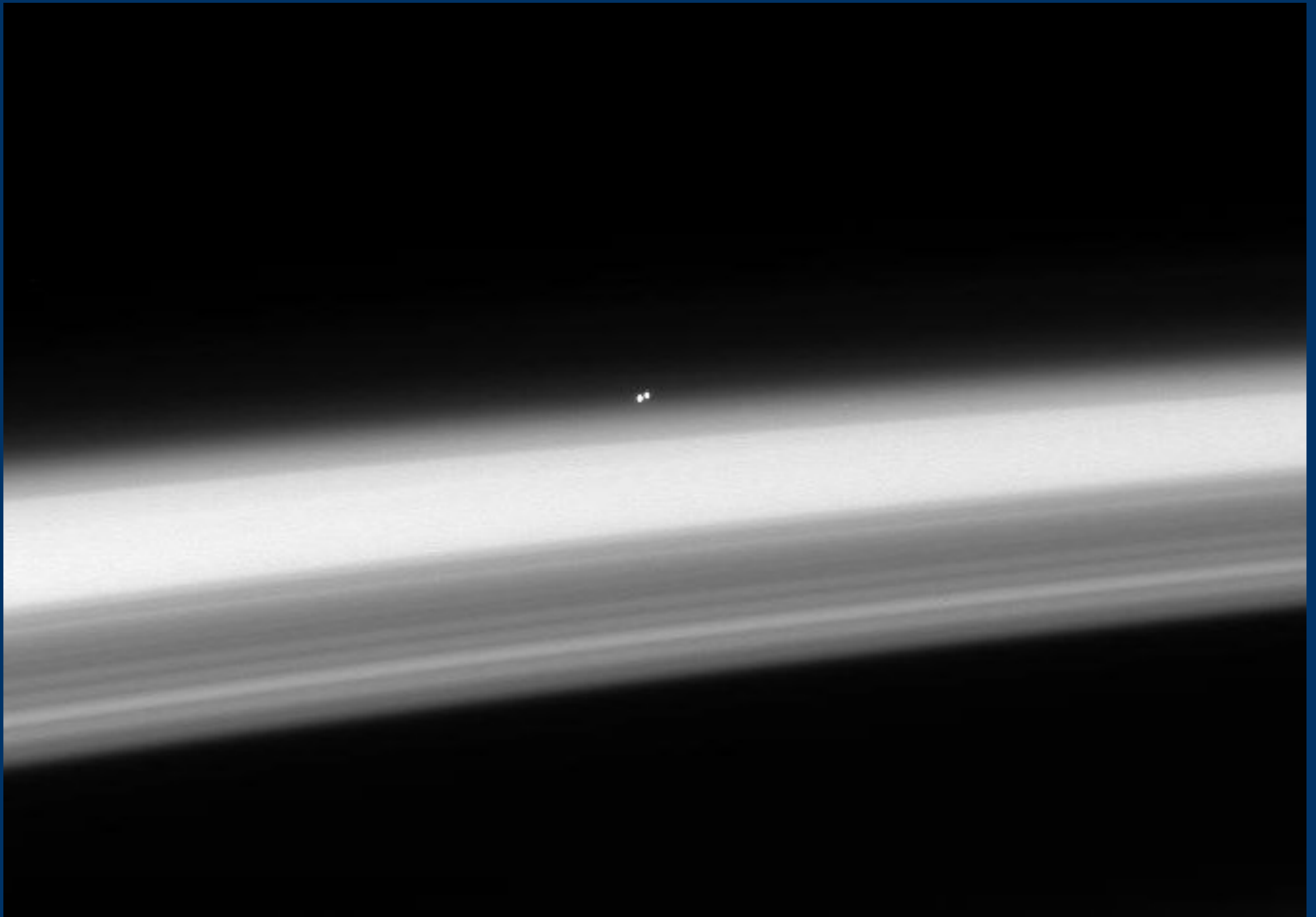
Egy kis obszervációs asztrofizika

(2020. március-április)

Alapvető jellemzők

- fényesség
- színekép
- szögátmérő (csillagkorong képe: átmérő + peremsötétedés)
- **kettősségre utaló jelek**





(alfa Cen A&B a Cassini-szonda által)

Kettőscsillagok az asztrofizika számára

- A színeképekből: hőmérséklet, légkör, kémiai összetétel.
- Ismert távolság esetén kiszámítható a sugár és luminozitás.
- Ami viszont nem megoldható: a tömeg becslése.
- Enélkül viszont nincs belső szerkezet, energiatermelés, fejlődési történet.
- A (szoros) kettőscsillagok kulcsfontosságú objektumok, fizikai megértésükig pedig a változékonyság elemzése vezet.
- Statisztikai vizsgálatokból tudjuk: a csillagok kb. fele kettős vagy többes rendszer tagja.

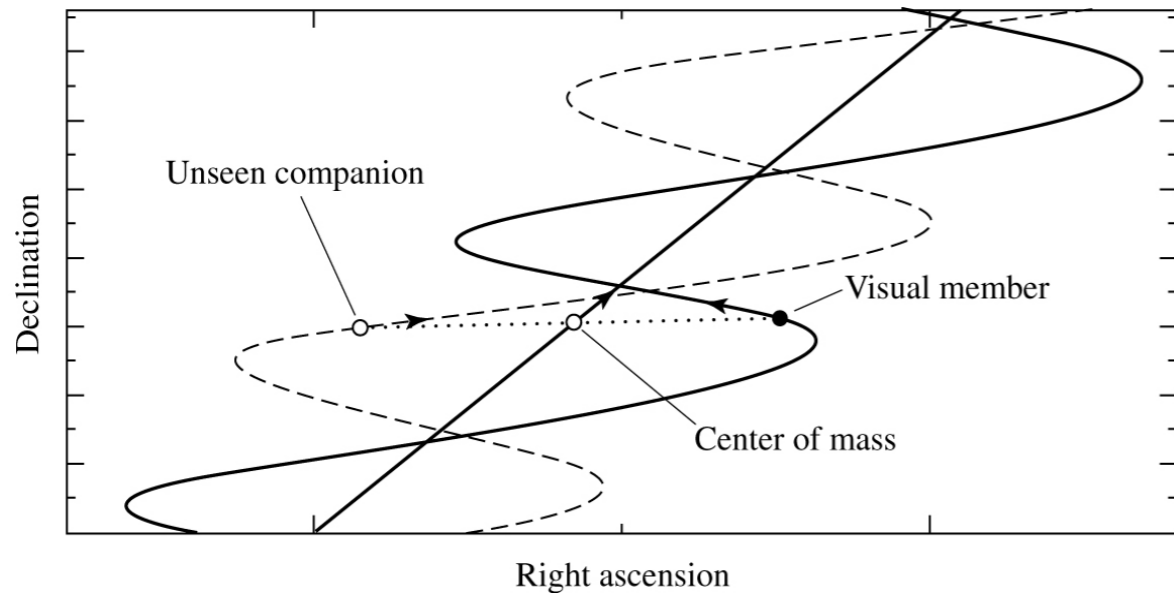
Kettőscsillagok az asztrofizika számára

- A színeképekből: hőmérséklet, légkör, kémiai összetétel.
- Ismert távolság esetén kiszámítható a sugár és luminozitás.
- Ami viszont nem megoldható: a tömeg becslése.
- Enélkül viszont nincs belső szerkezet, energiatermelés, fejlődési történet.
- A (szoros) kettőscsillagok kulcsfontosságú objektumok, fizikai megértésükig pedig a változékonyság elemzése vezet.
- Statisztikai vizsgálatokból tudjuk: a csillagok kb. fele kettős vagy többes rendszer tagja.

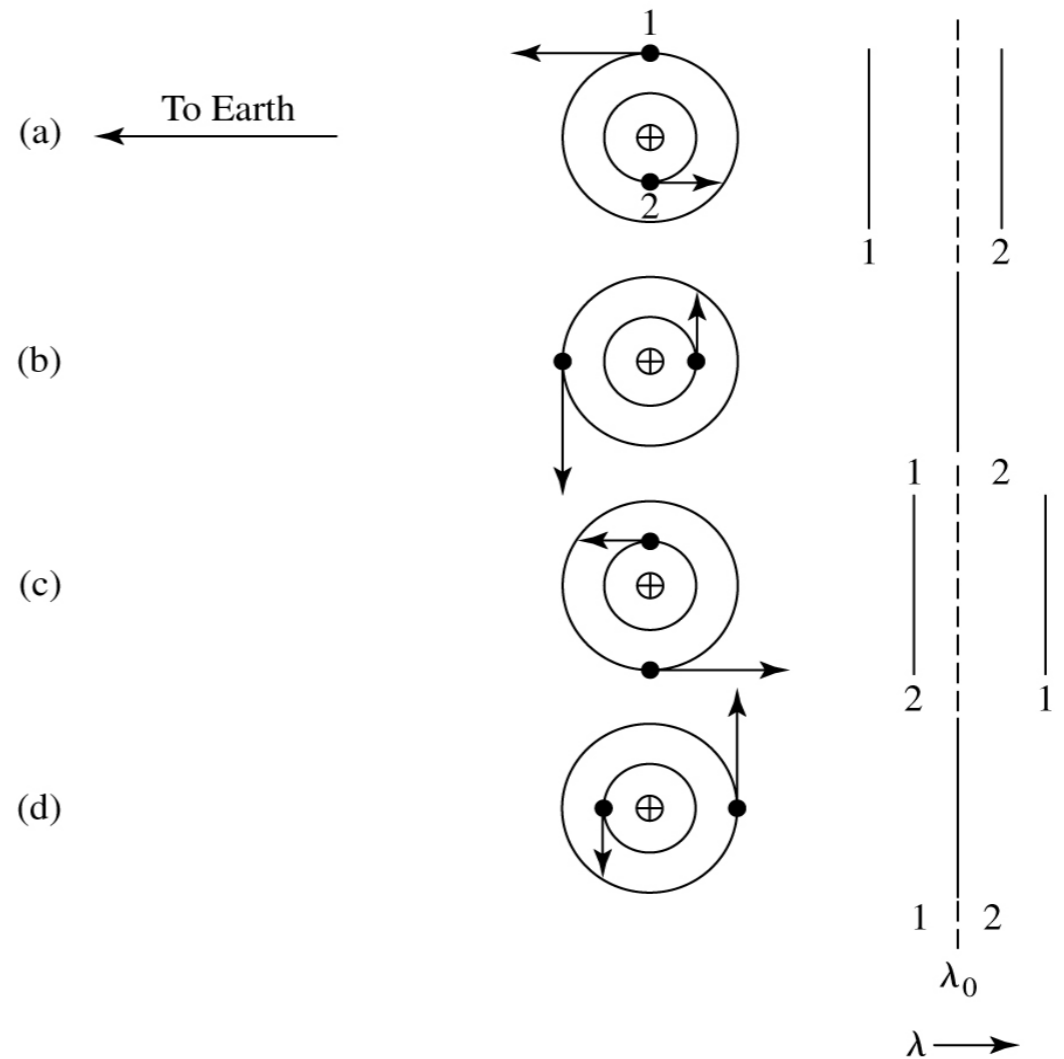
Legfőbb kettőscsillag-típusok

- **Optikai párok:** véletlen egybeesésként egymás mellett látszó csillagok
- **Vizuális kettősök:** felbonthatók, egyedi komponensek relatív mozgása mérhető
- **Asztrometriai kettősök:** csak egy komponens látszik, amelynek hullámzó sajátmozgása árulja el a láthatatlan kísérő létét.
- **Fedési kettősök:** periodikus elhalványodások kölcsönös fedések következtében.
- **Spektroszkópiai kettősök:** periodikus Doppler-eltolódások a színeképvonalakban. SB2 vs. SB1

Balra: egy asztrometriai kettős sajátmozgása. Hipparcos (1989-1993), Gaia (2013-...)



Jobbra: periodikus Doppler-eltolódások egy SB2 spektroszkópai kettősben



Kepler III. törvénye:

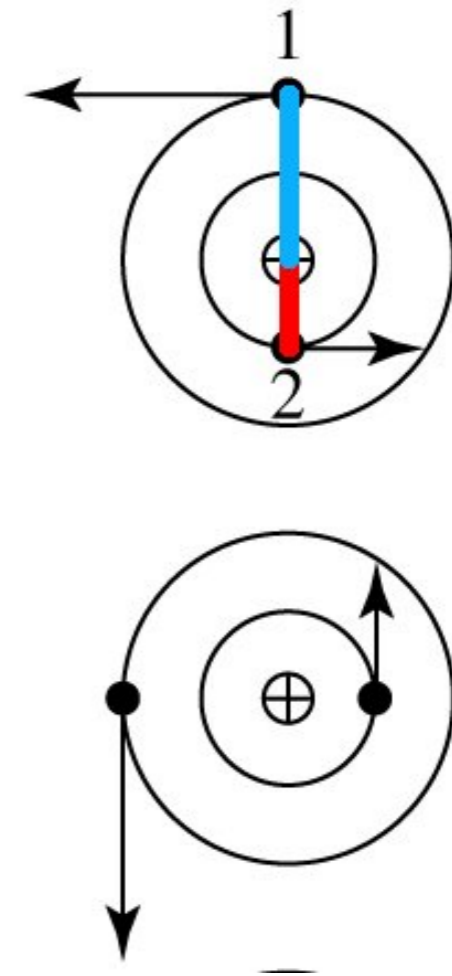
$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(m_1 + m_2)}{4\pi^2}$$

$$a = a_1 + a_2$$

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

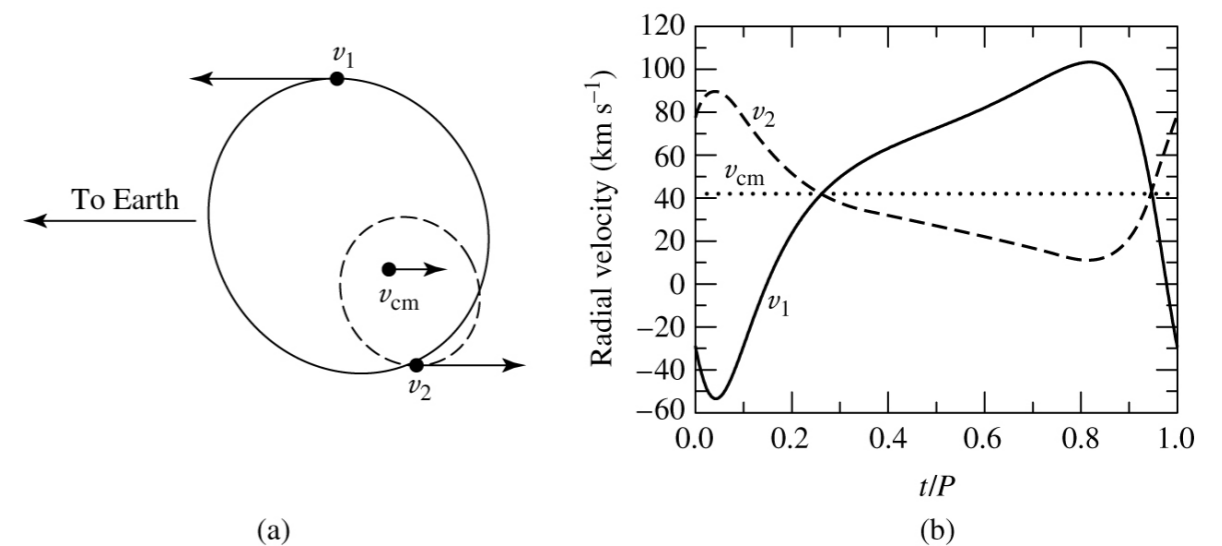
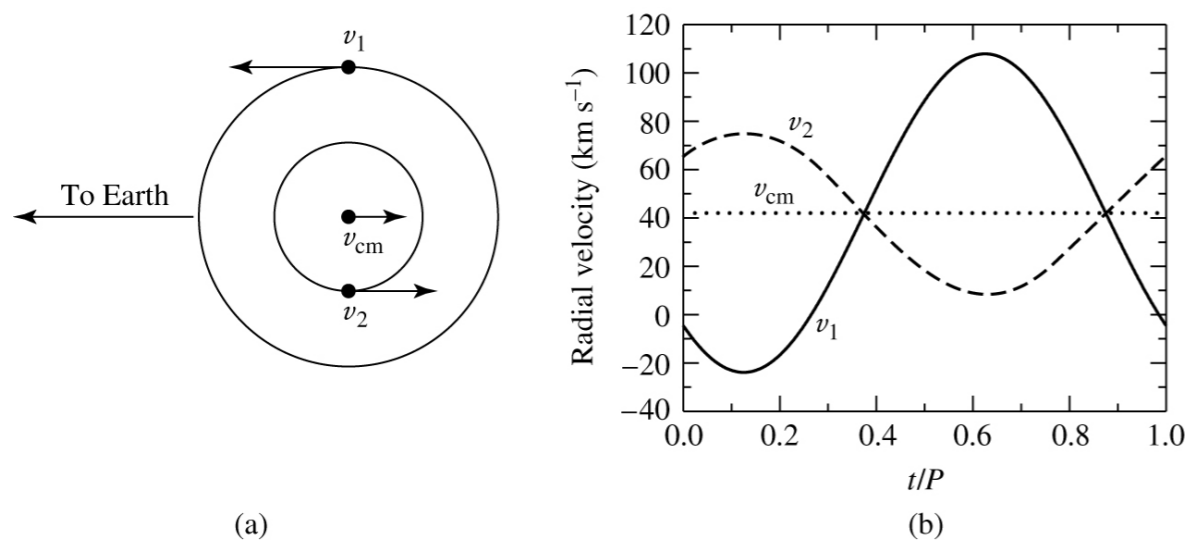
- Egyszerű mértékegységek: ha a félnagy tengely CSE-ben, periódus évben, a jobb oldalon az össztömeg lesz naptömegben

To Earth
←



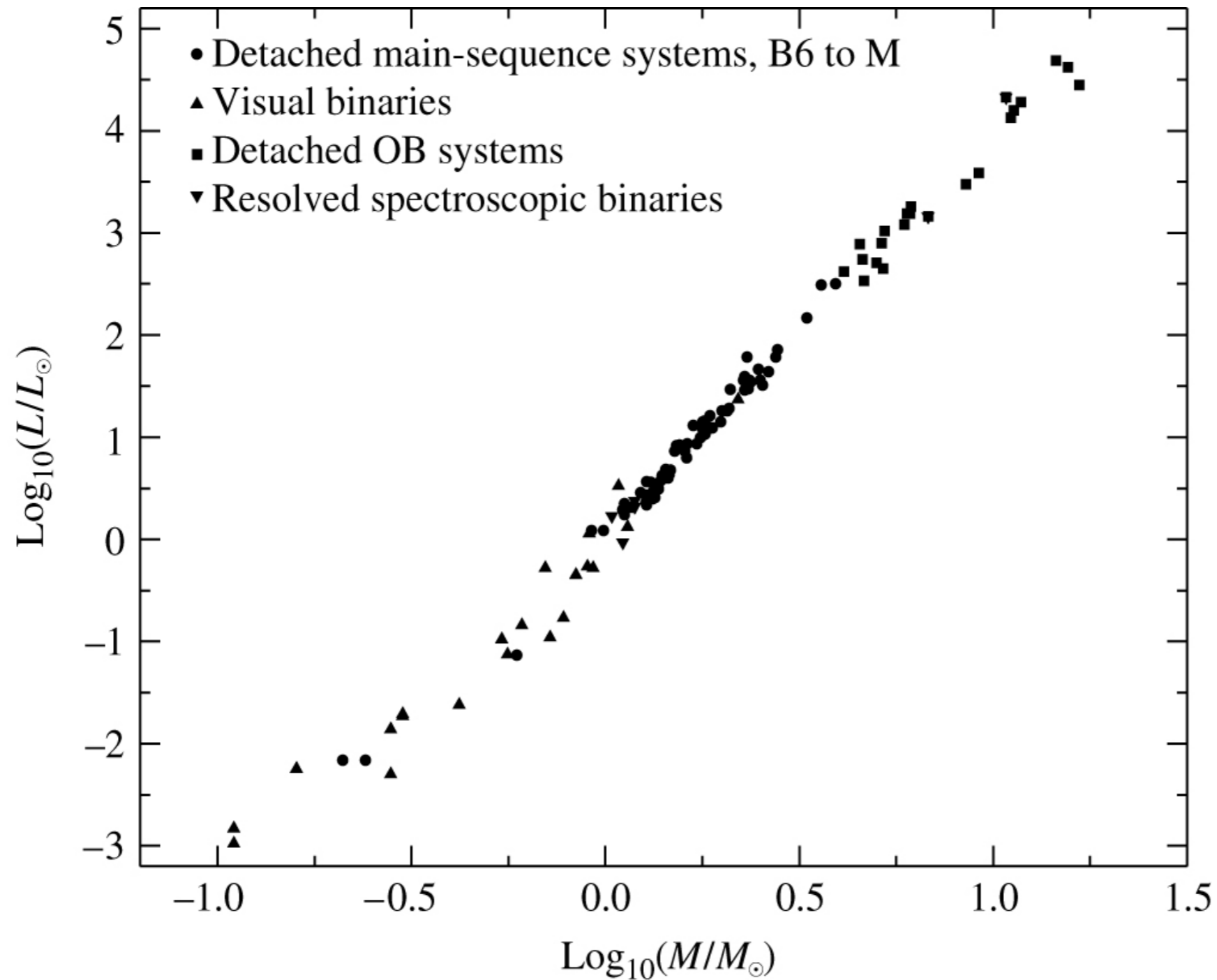
Fedési, spektroszkópai kettősök: a leghasznosabbak

- SB2 fedési kettősökre teljes megoldás: egyedi tömegek, relatív sugarak, abszolút sugarak, fényességárány, effektív hőmérséklet. Ami kell: fénygörbe és radiálissebesség-görbe.



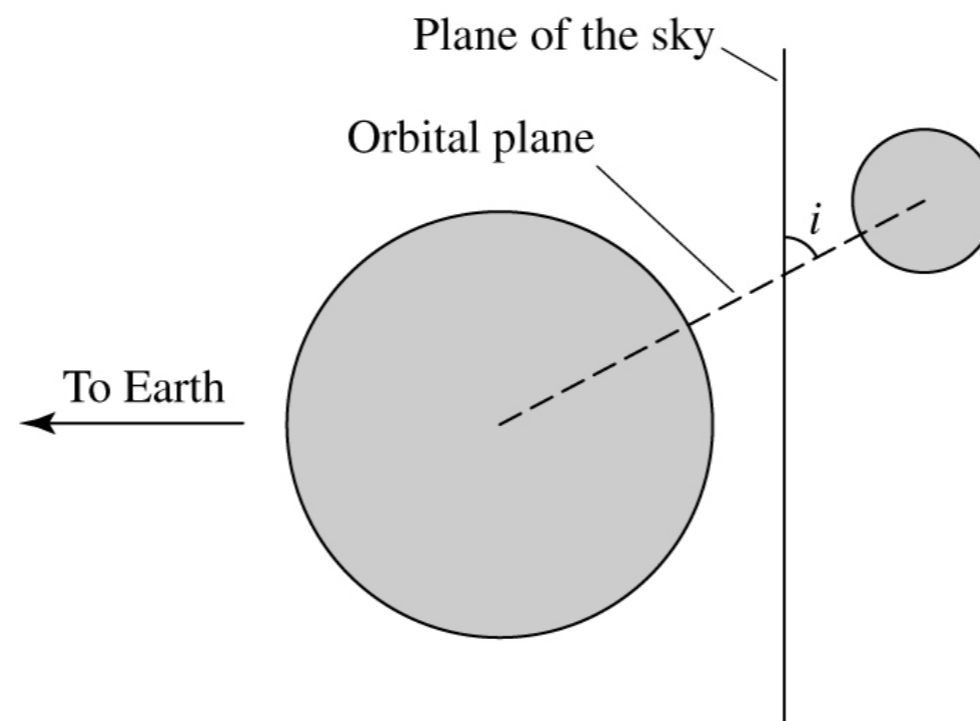
- Balra: körpálya szinuszos sebességek; jobbra: excentrikus pályára torz sebességgörbe.

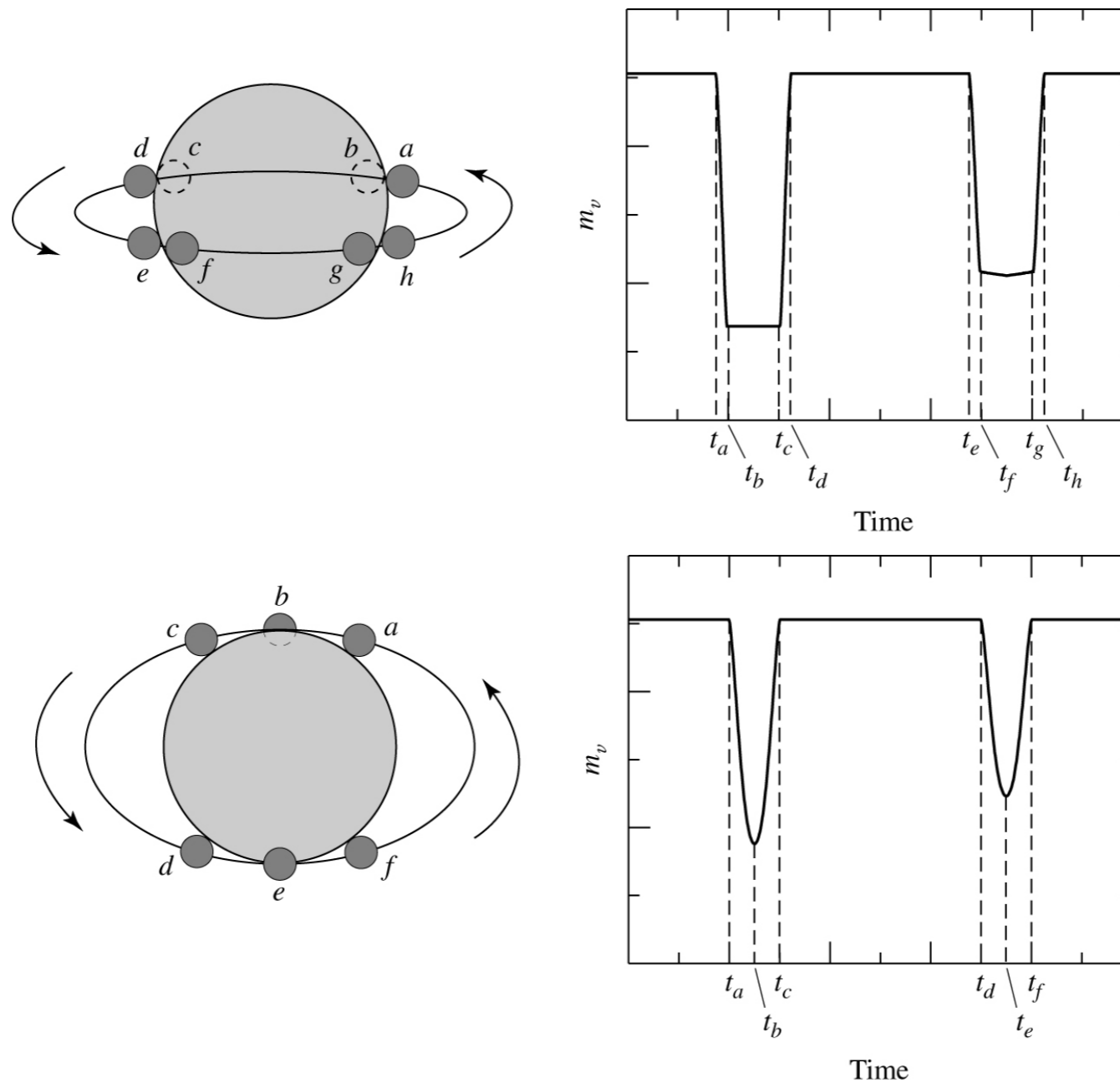
Ilyen rendszerekkel lehetett kalibrálni
a **tömeg-fényesség** relációt!



Fedési kettősök

- Nagyon jellegzetes fényességváltozás. A fénygörbék részletes modellezésével a pályahajlást és teljes geometriai leírást meg lehet kapni.





Fedési görbe éléről látszó pálya esetén (felül), illetve részleges fedésekkel (alul). A relatív sebességek és a különböző fázisok időtartama megadja a csillagok abszolút méretét.

Exobolygók: kettős rendszerek csillagnál kisebb kísérővel

- Több módszer a detektálásra
- **Radiálissebesség-módszer:** a csillagot SB1 kettősnek tekintjük
- **Fedési (tranzit) módszer:** a csillagot fedési kettőscsillagnak tekintjük
- **Gravitációs mikrolencsézés:** háttércsillag felfényedésében extra jel
- **Fényidő-effektus periodikusan változót központi csillagokra:** fázismoduláció

...és még egy csomó más.

1 January 2018
 3572 exoplanets
 (~2600 systems, ~590 multiple)
 [numbers from NASA Exoplanet Archive]

Exoplanet Detection Methods

Indirect/ miscellaneous

- protoplanetary disks
- debris disks/colliding planetesimals
- star accretion/pollution
- white dwarf pollution
- radio emission
- X-ray emission
- gravitational waves

Dynamical

Microlensing

Photometry

Imaging

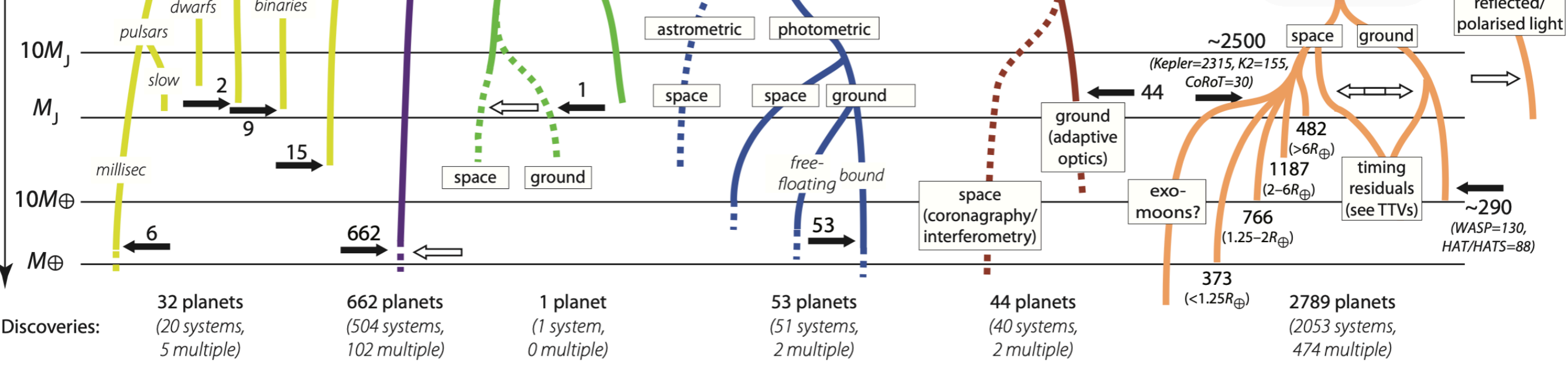
Transits

Timing

Astrometry

Radial velocity

decreasing planet mass



existing capability
 projected
 n = planets known
 discoveries
 follow-up detections

(exoplanet.eu)

Exoplanet Detection Methods Visualized

Simple Telescope



A twinkling star caused by atmospheric effects

Pulsar Timing

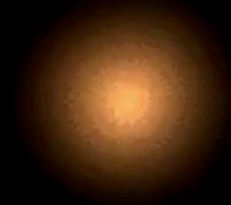
[5]



Pulsar Frequency by Radio
[orbit • mass]

Radial Velocity

[511]



Star Motion by Doppler Effect
[orbit • mass]

Transit

[1,137]



Star Brightness by Eclipse
[orbit • radius • atmosphere]

Stars appear to twinkle with many colors as observed by the naked eye or simple telescopes.

Precise instruments were required to remove this atmospheric effect and reveal planets.

Since 1992 we know of over 1,800 planets around other stars detected by six main methods.

Astrometry

[1]



Star Motion by Imaging
[orbit • mass]

Microlensing

[26]



Star Brightness by Lensing
[orbit • mass]

Direct Imaging

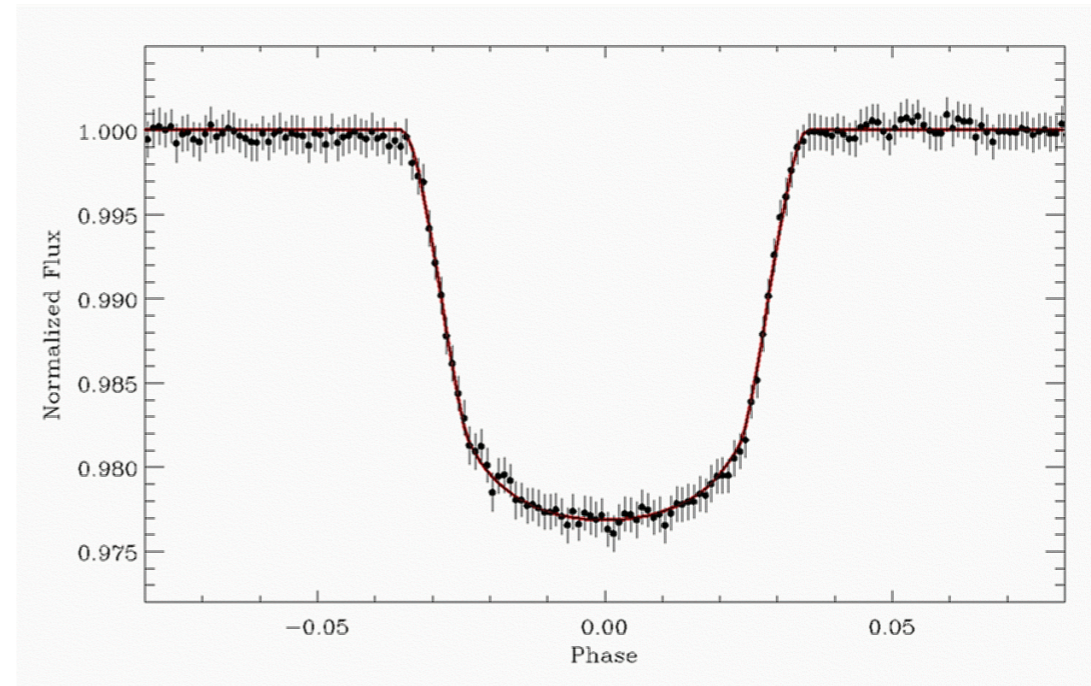
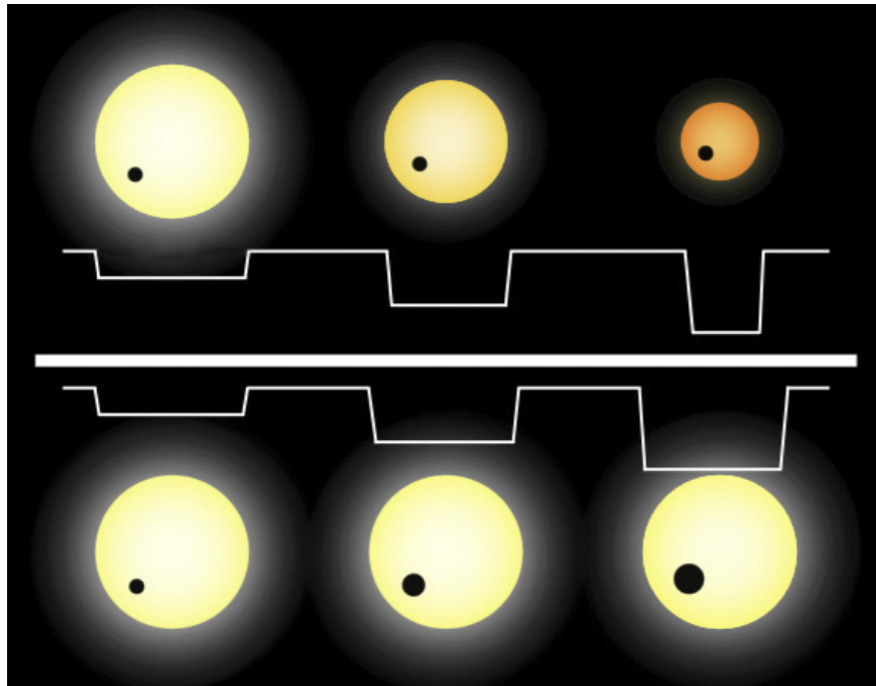
[35]



Planet Brightness by Imaging
[orbit • radius • atmosphere]

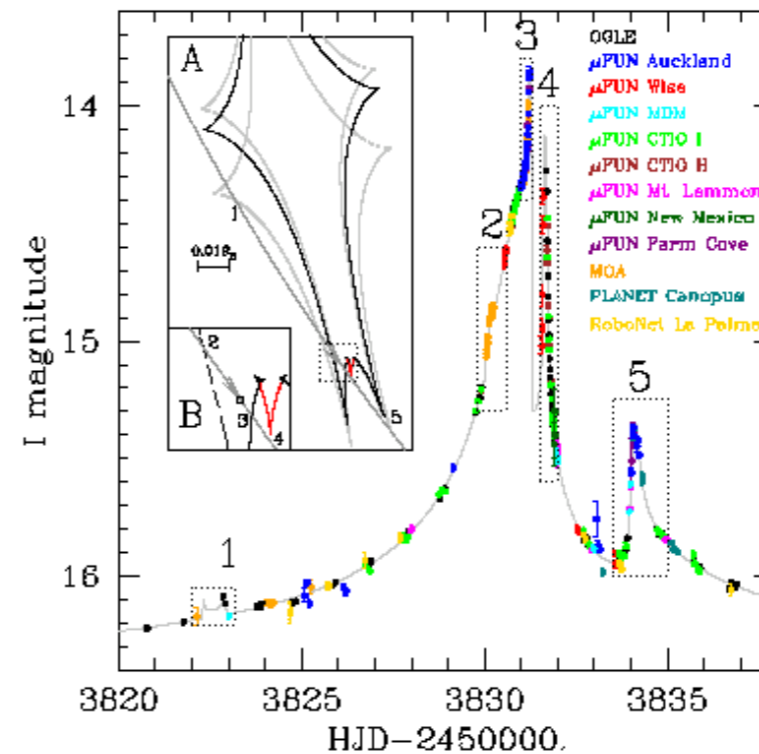
Várható jel

- **Radiális sebesség-módszer:** ~1-100 m/s; a tömegarányával és a pályasugárral skálázódik
- **Fedési (tranzit) módszer:** ~1% exojupiterekre; 0.01% exoföldrekre
- **Gravitációs mikrolencsézés:** csak egyszer és soha többé nem észlelhető
- **Fényidő-effektus periodikusan változót központi csillagokra:** ~ 10^{-6} relatív frekvenciamoduláció; a pályamérettel skálázódik

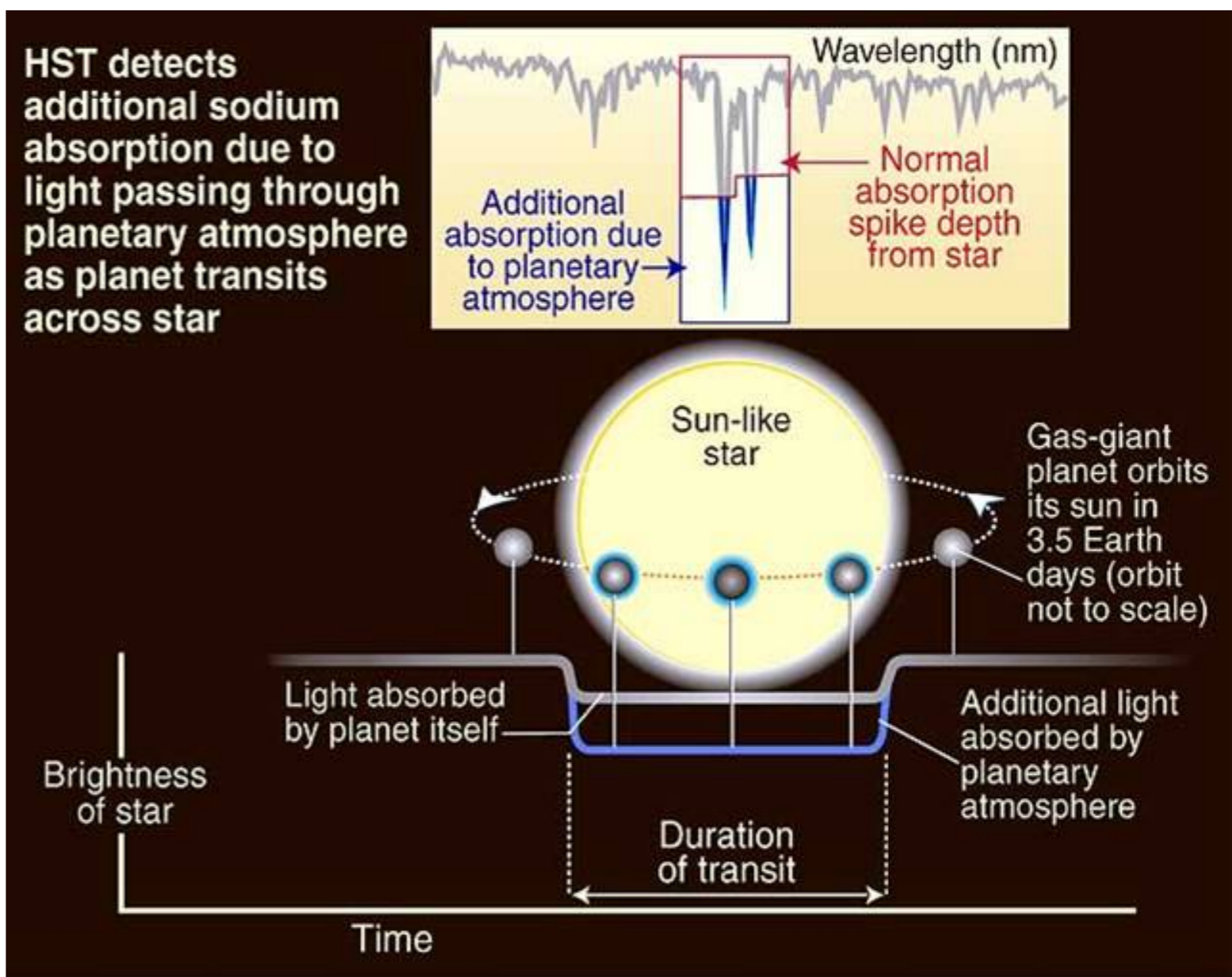
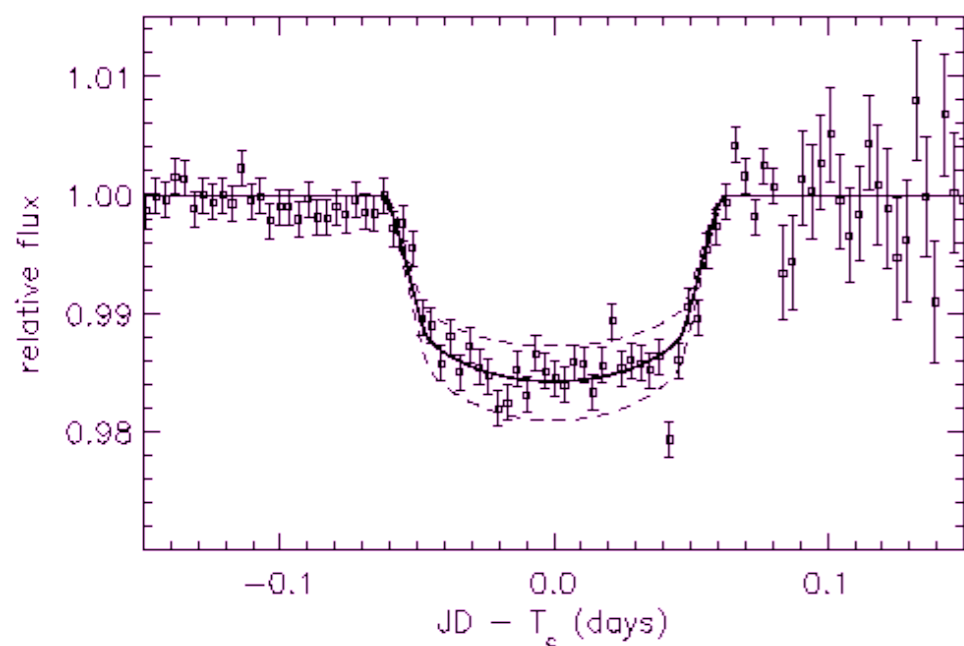
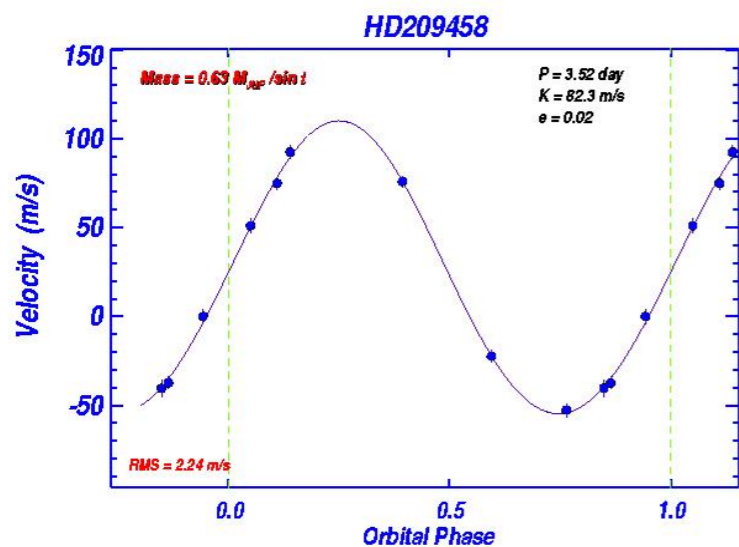


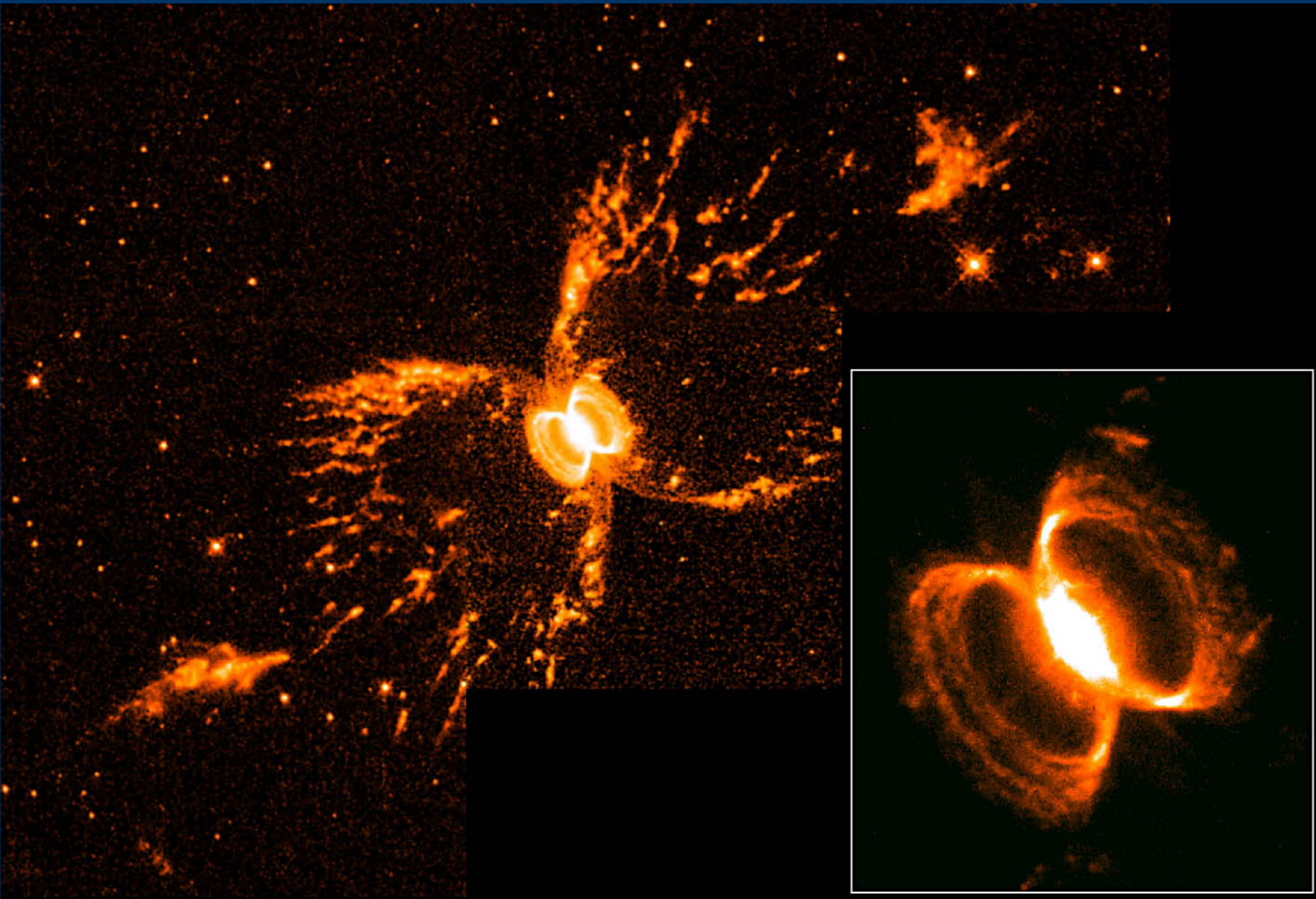
Balra: a fedés mélysége $(R_p/R_s)^2$ -vel skálázódik. Jobbra: a CoRoT-Exo-1b fedése.

A mikrolencse-jelenségek csak egyszer történnek, de nagyon érzékenyek a bolygókra.



HD 209458: a legelső Doppler és fedési bolygó. Bizonyos spektrumvonalakban a fedés mélysége különböző, ami a bolygó kiterjedt légkörére utal.

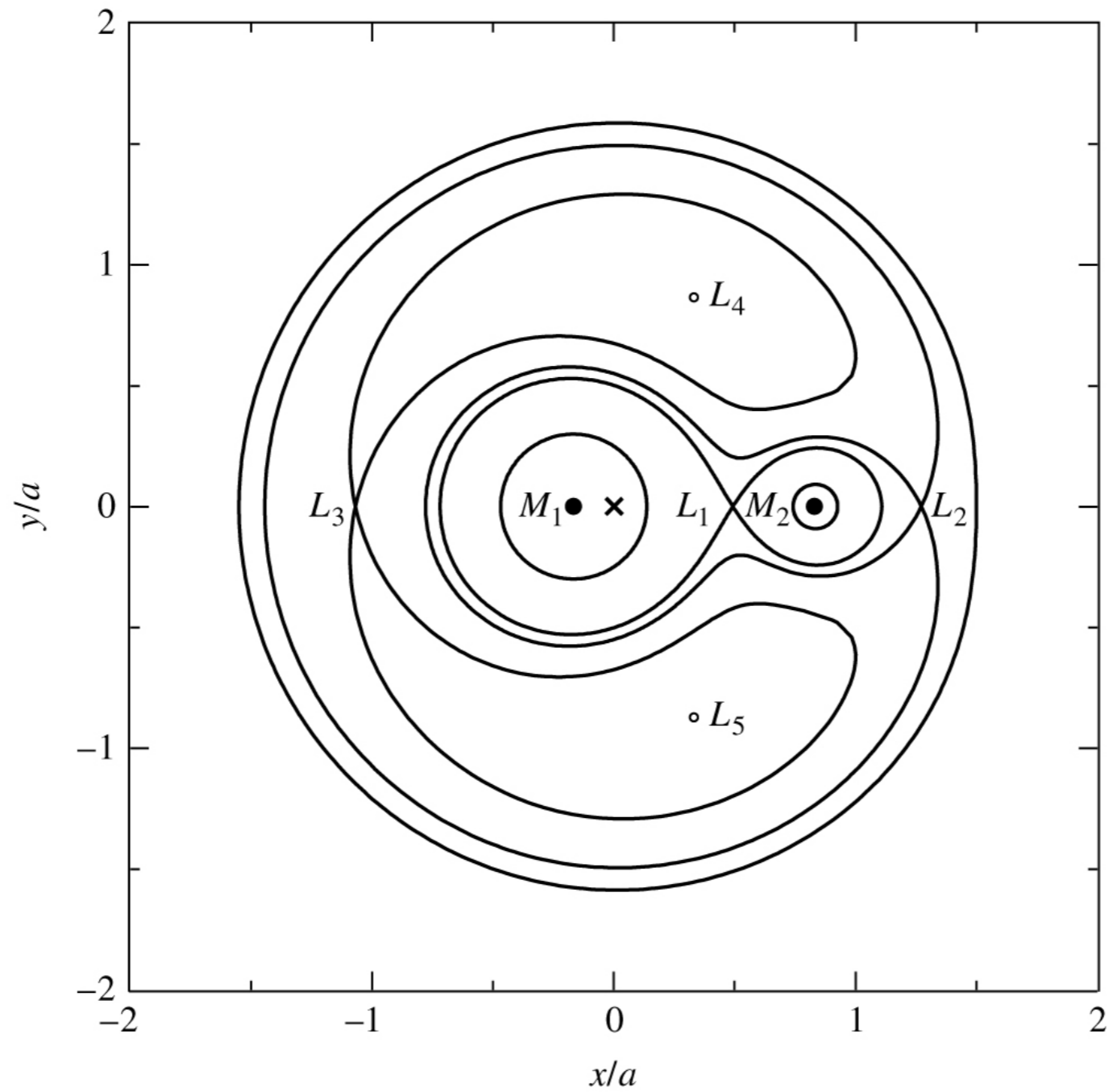




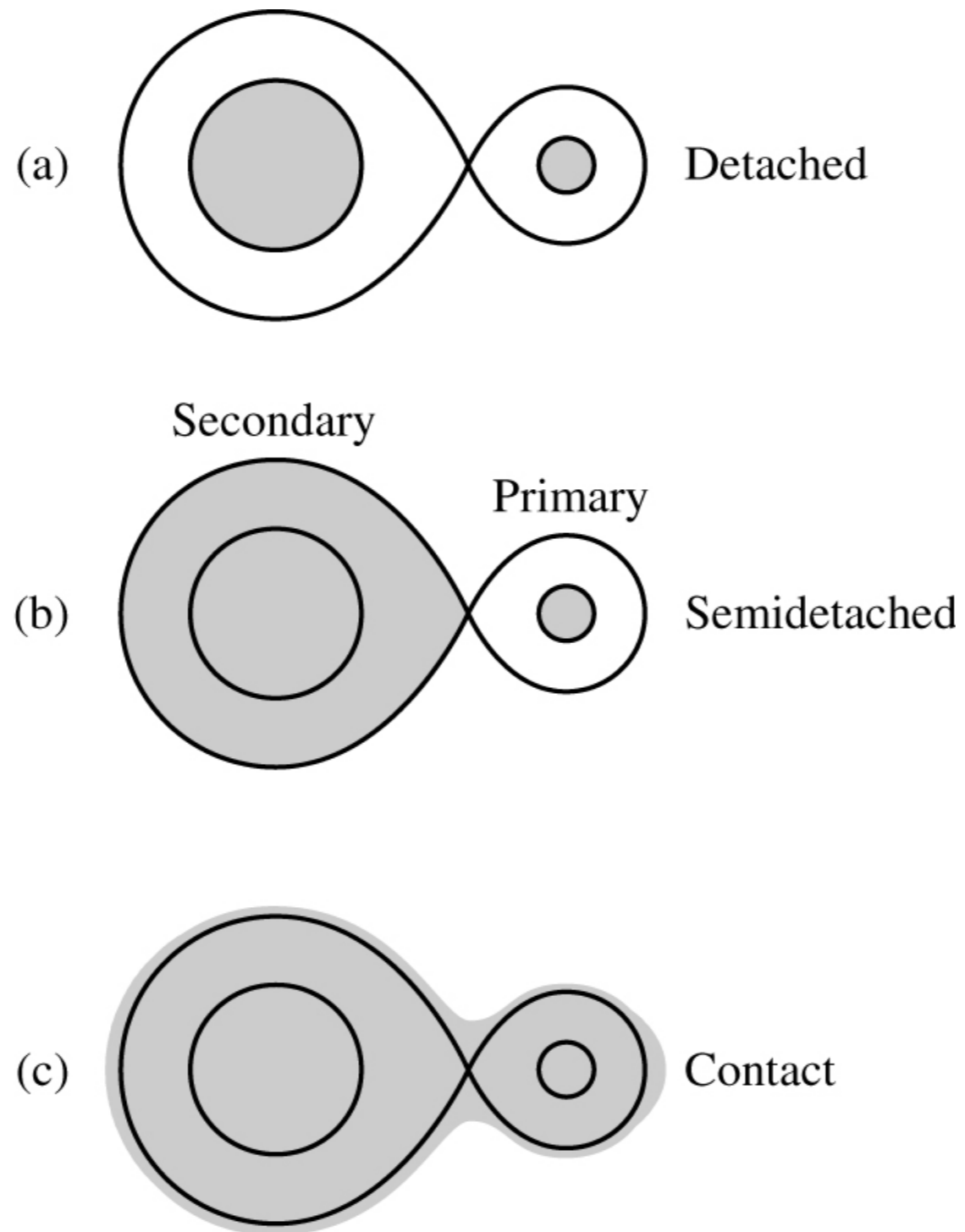
(A Déli Rák-köd, HST)

Szoros kettőscsillagok és akkréciós korongok

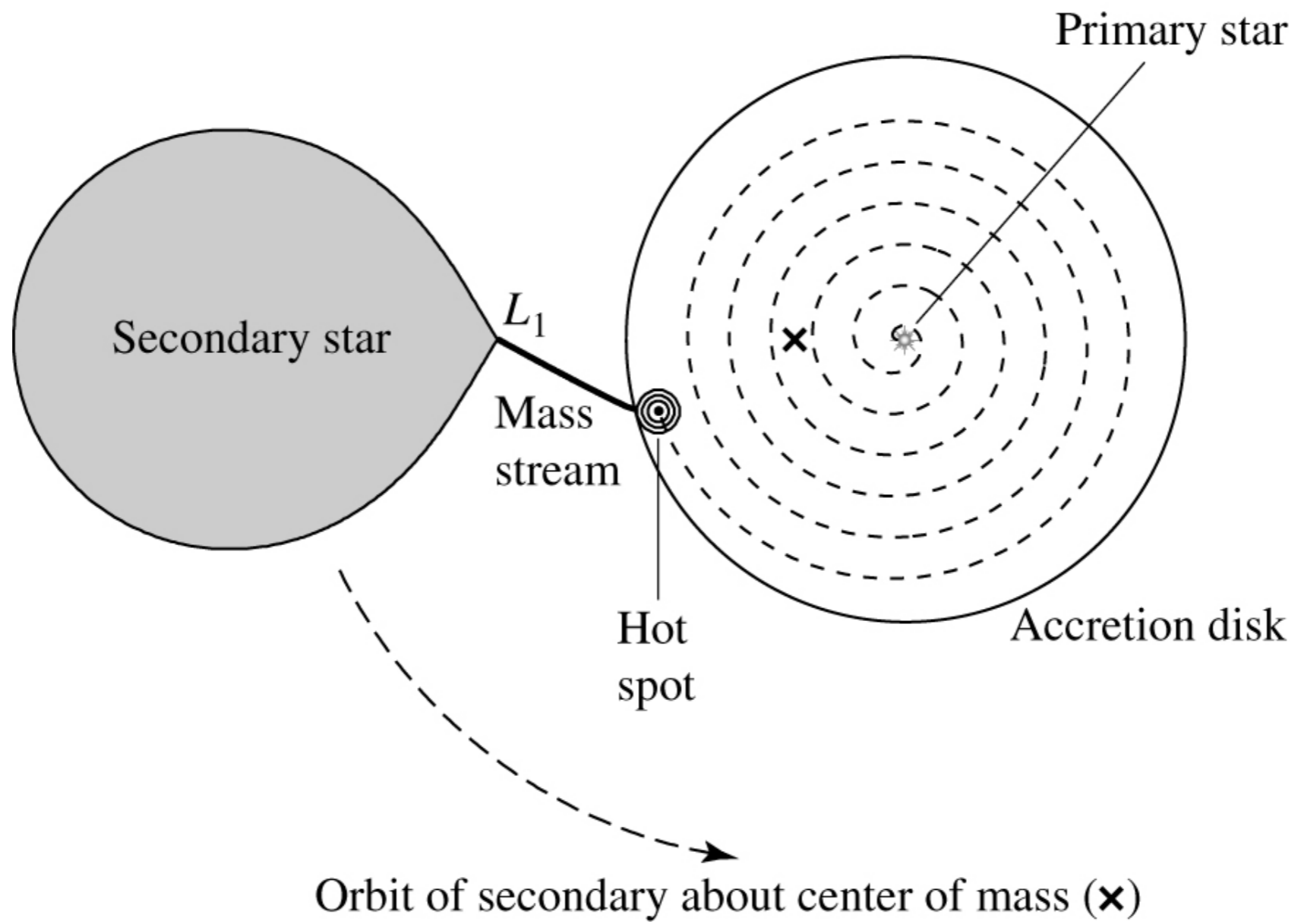
- Szoros kettős rendszerekben a gravitációs kölcsönhatások eltorzítják a csillagok alakját, illetve tömegátadást is előidézhetnek.
- A kölcsönható kettőscsillagokban erős tömegátadás jelentkezik, egyik komponens általában kompakt objektum (fehér törpe, neutroncsillag, fekete lyuk)
- Hirtelen energiafelszabadulások, igazi csillagrobbanások helyszínei

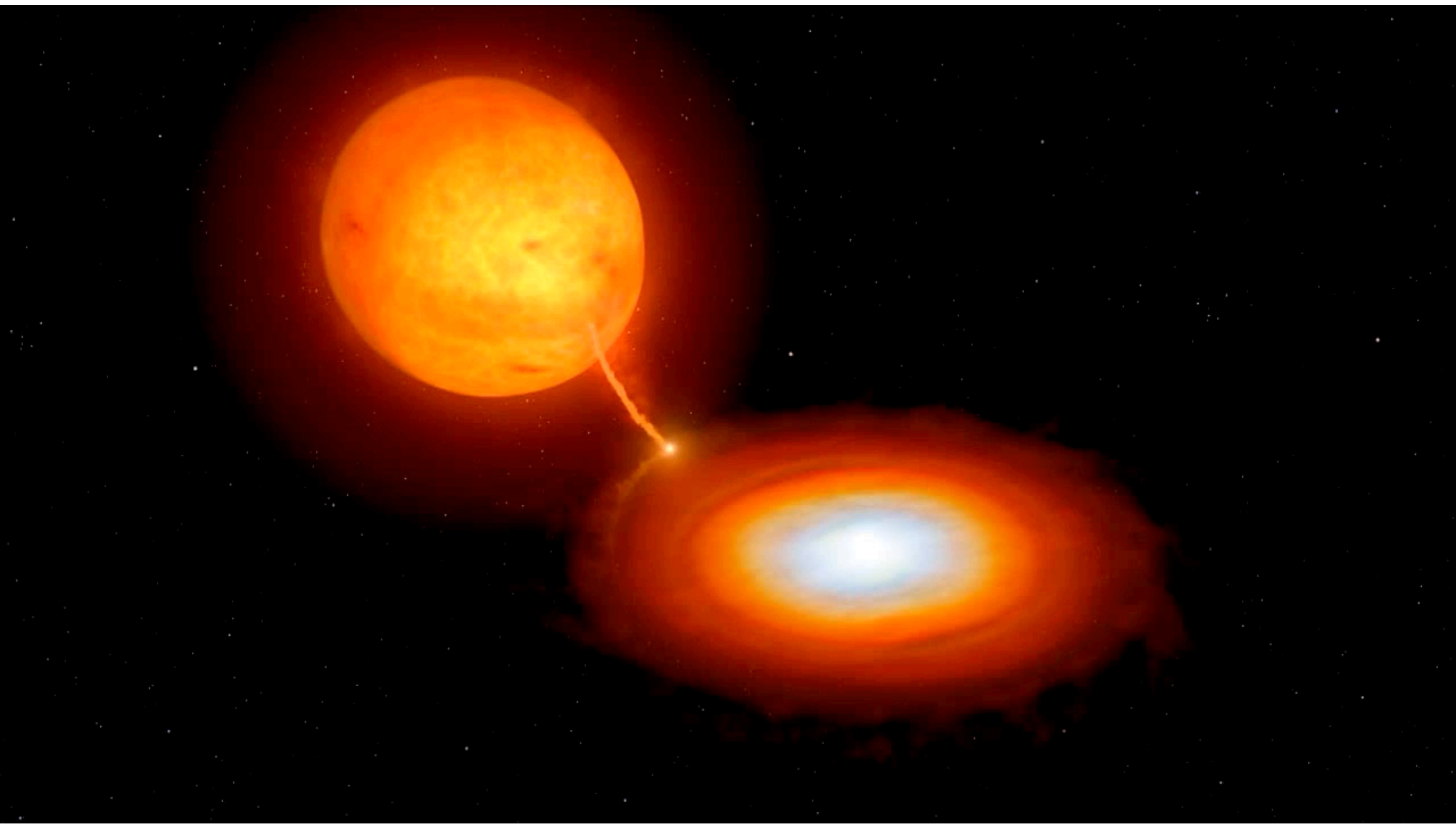


Ekvipotenciális felületek egy szoros kettősben ($M_2/M_1=0.2$). L_i ($i=1..5$) a Lagrange-pontokat jelzi. A Roche-üregek az L_1 pontban érintkező belső térfogatok.



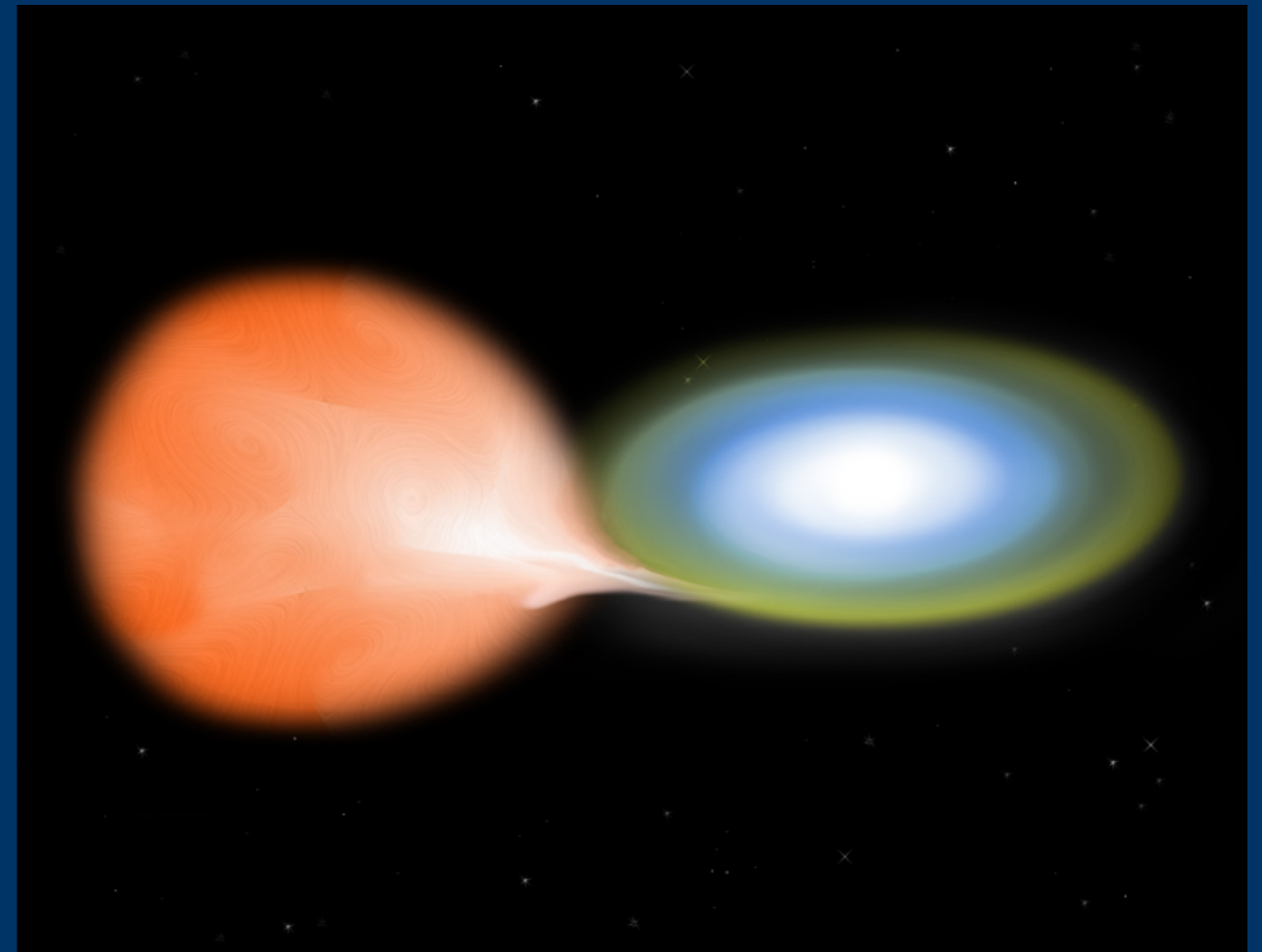
Osztályozás a Roche-térfogat kitöltöttsége alapján





A “nóvák” három típusa

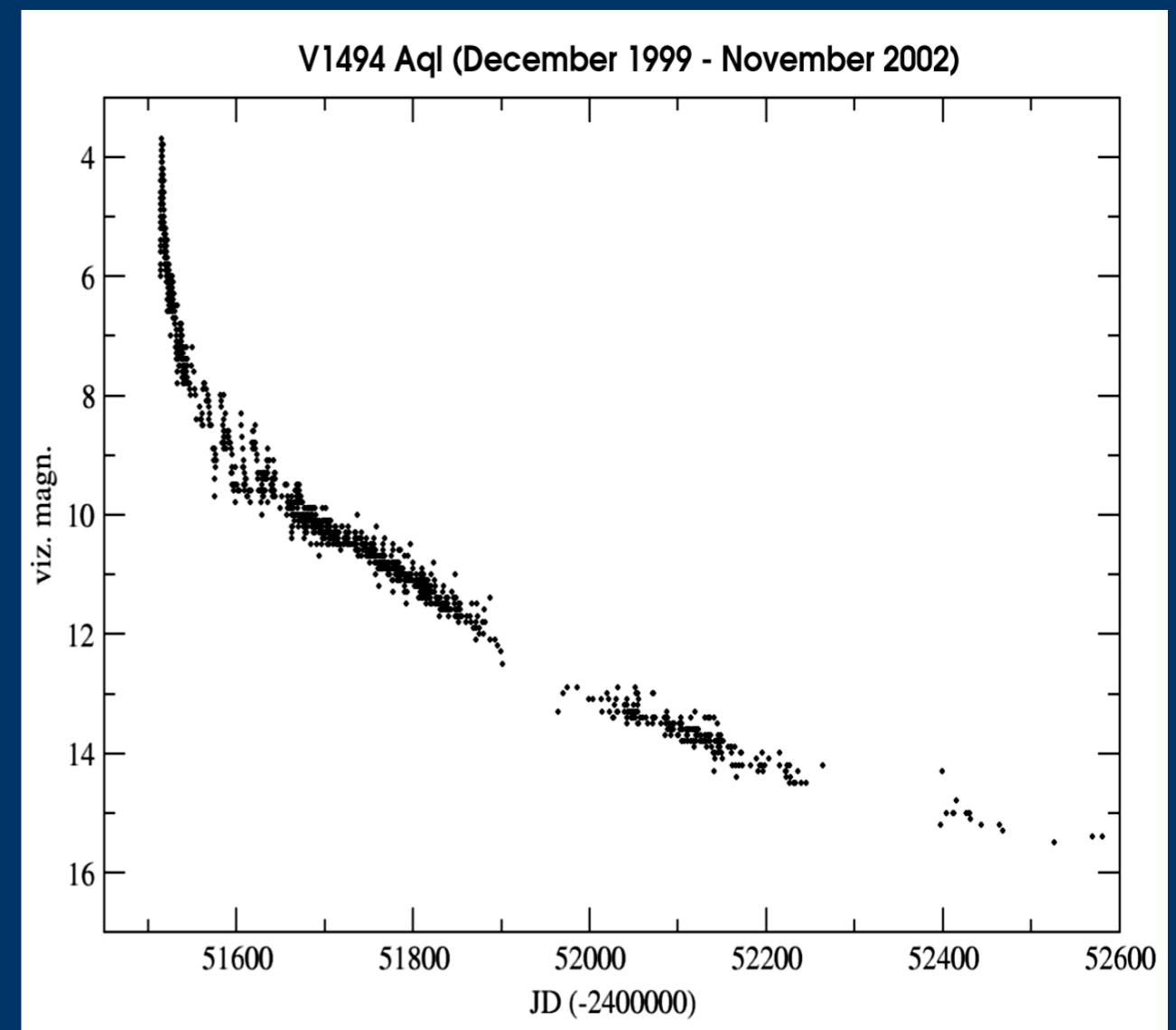
- **Törpe nóvák**
instabil akkréciós korong,
nincsenek termonukleáris
reakciók, ismétlődő jelenség
(5-5000 nap)
- **Klasszikus nóvák**
termonukleáris túlfutás a fehér
törpe felszínén, ismétlődő
jelenség (10-10000 év)
- **(Ia) szupernóvák**
a fehér törpe teljes és
visszafordíthatatlan
megsemmisülése



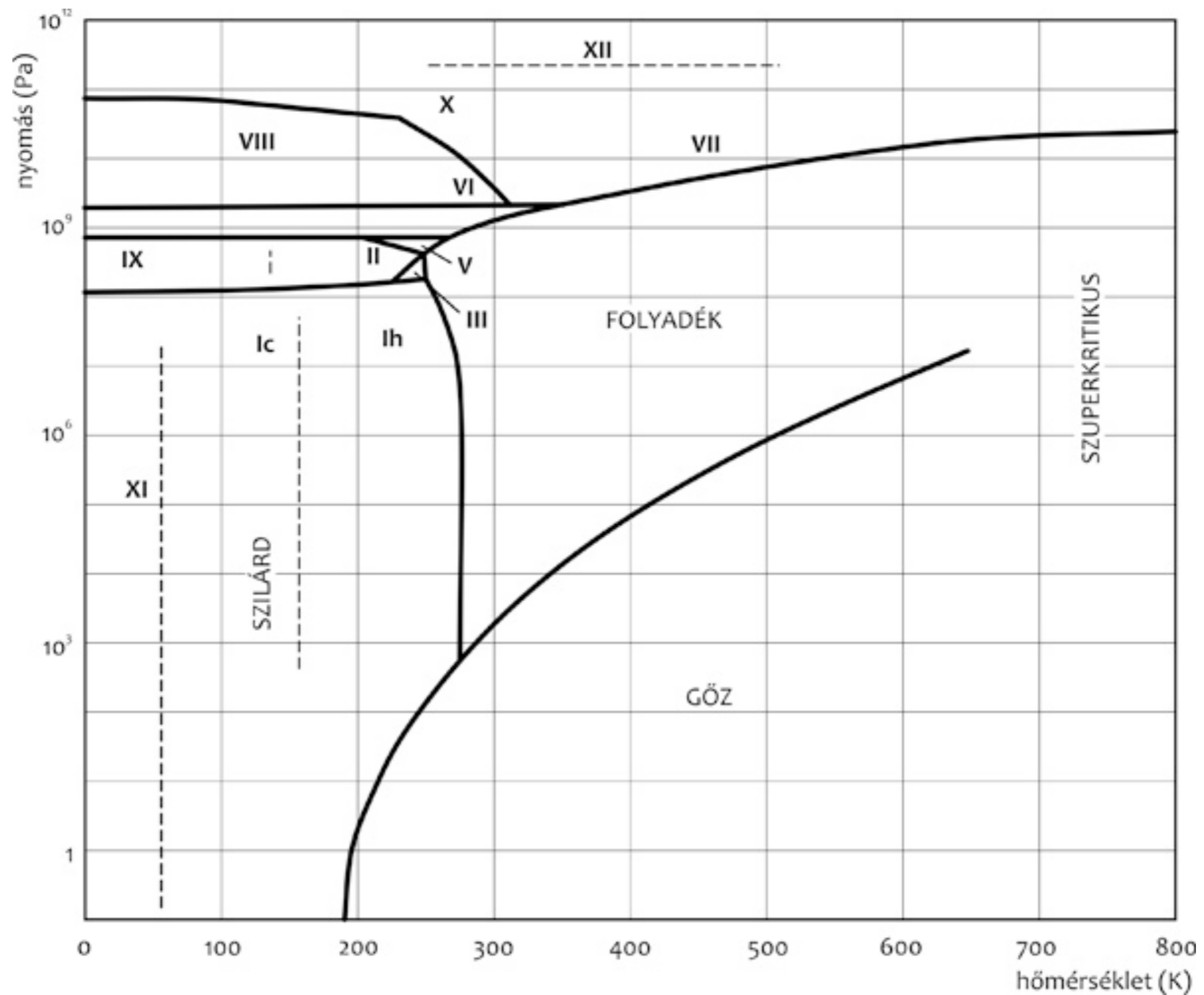
(Chandra PR)

Klasszikus n6v6k: “új” csillagok, amikre m6g soha senki nem figyelt fel

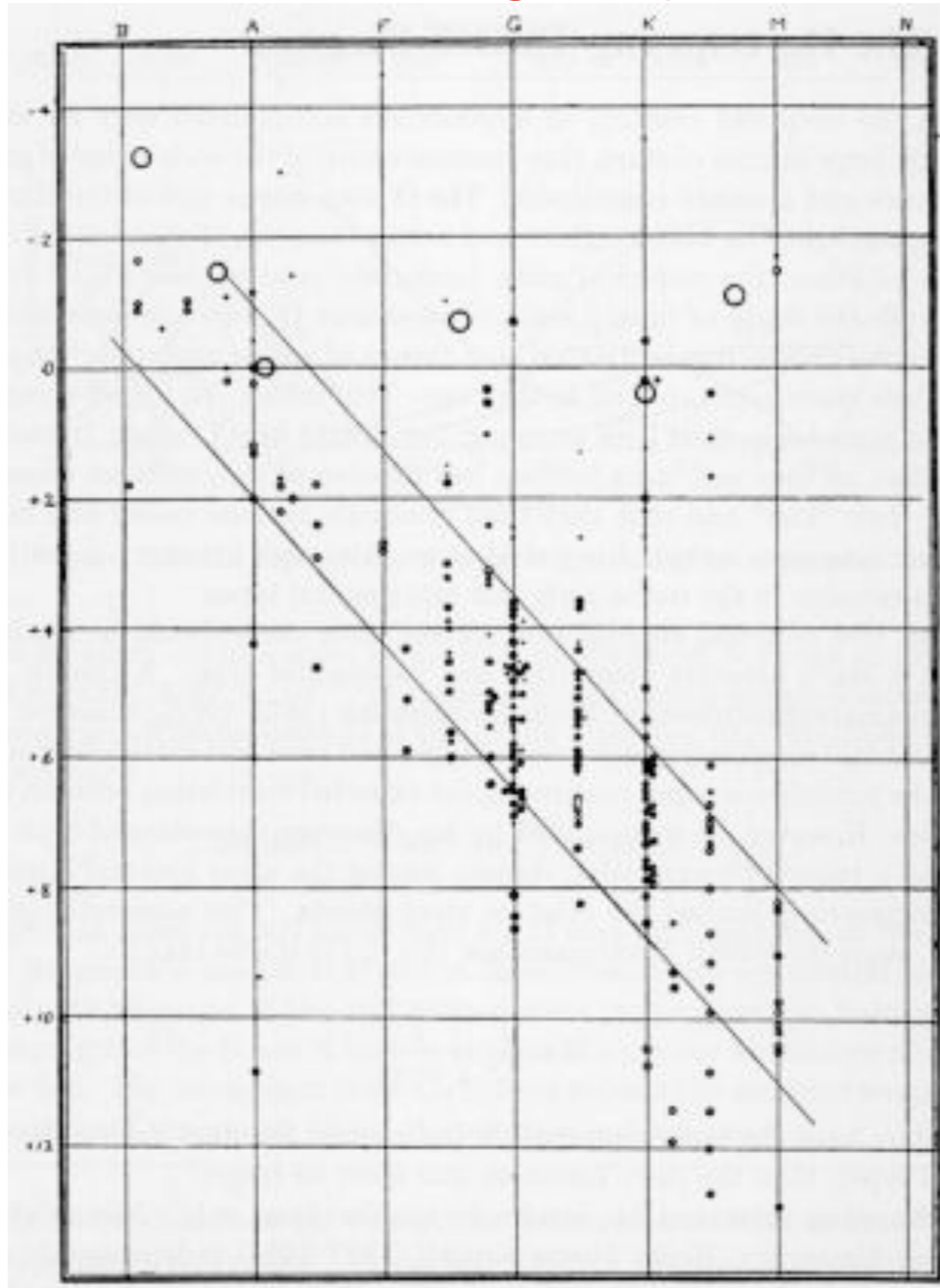
- A kit6r6s amplit6d6ja: 7-12 mag (V1500 Cyg: >20 mag!)
- Gyors halv6nyod6s a maximum ut6n (sebess6goszt6lyok t_n alapj6n)
- Abszol6t f6nyesség maximumban: -7 ... -10 mag
- $M_V \sim a_n + b_n \log t_n$
($n=2, 3$)



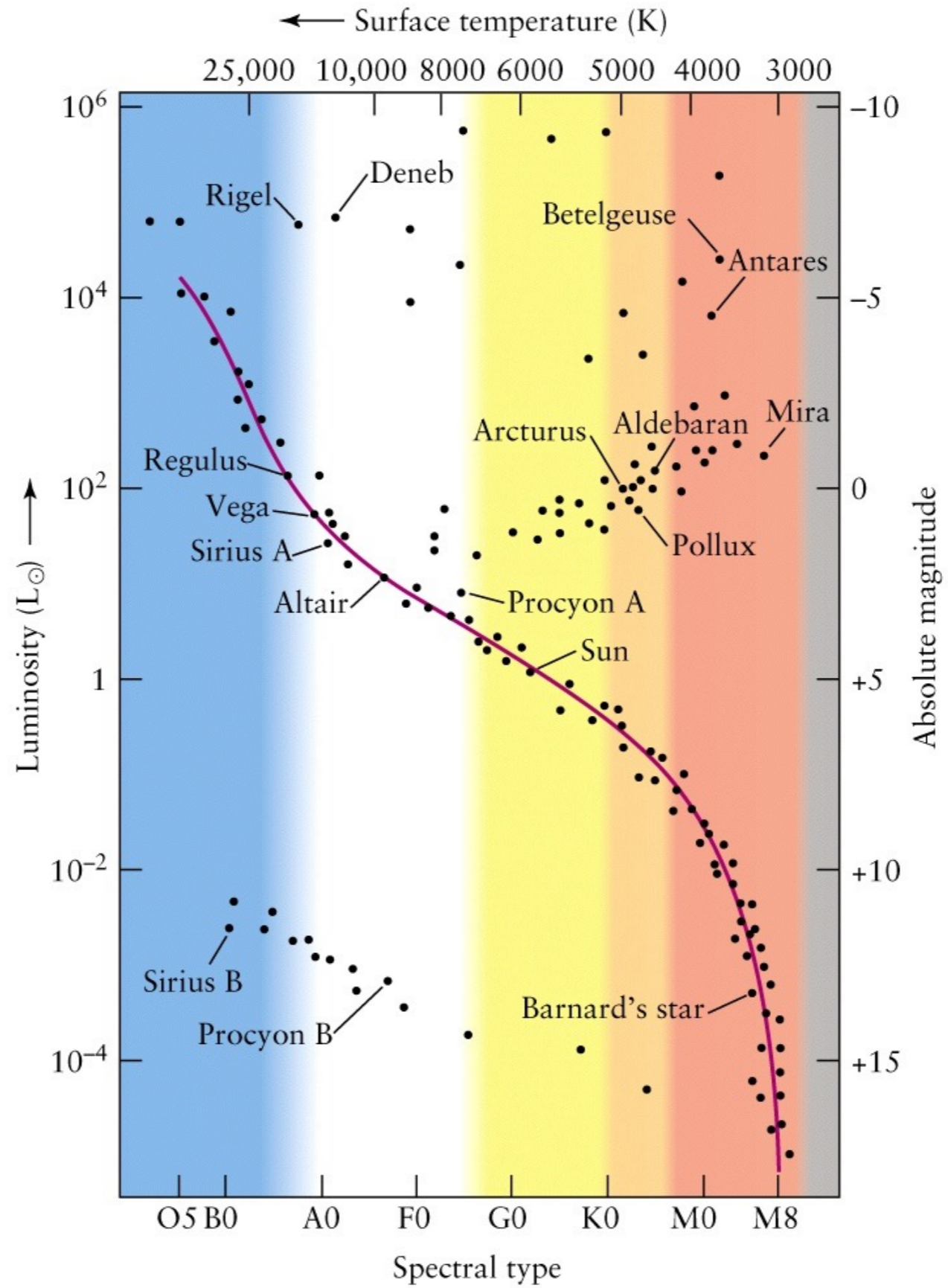
A víz fázisdiagramja



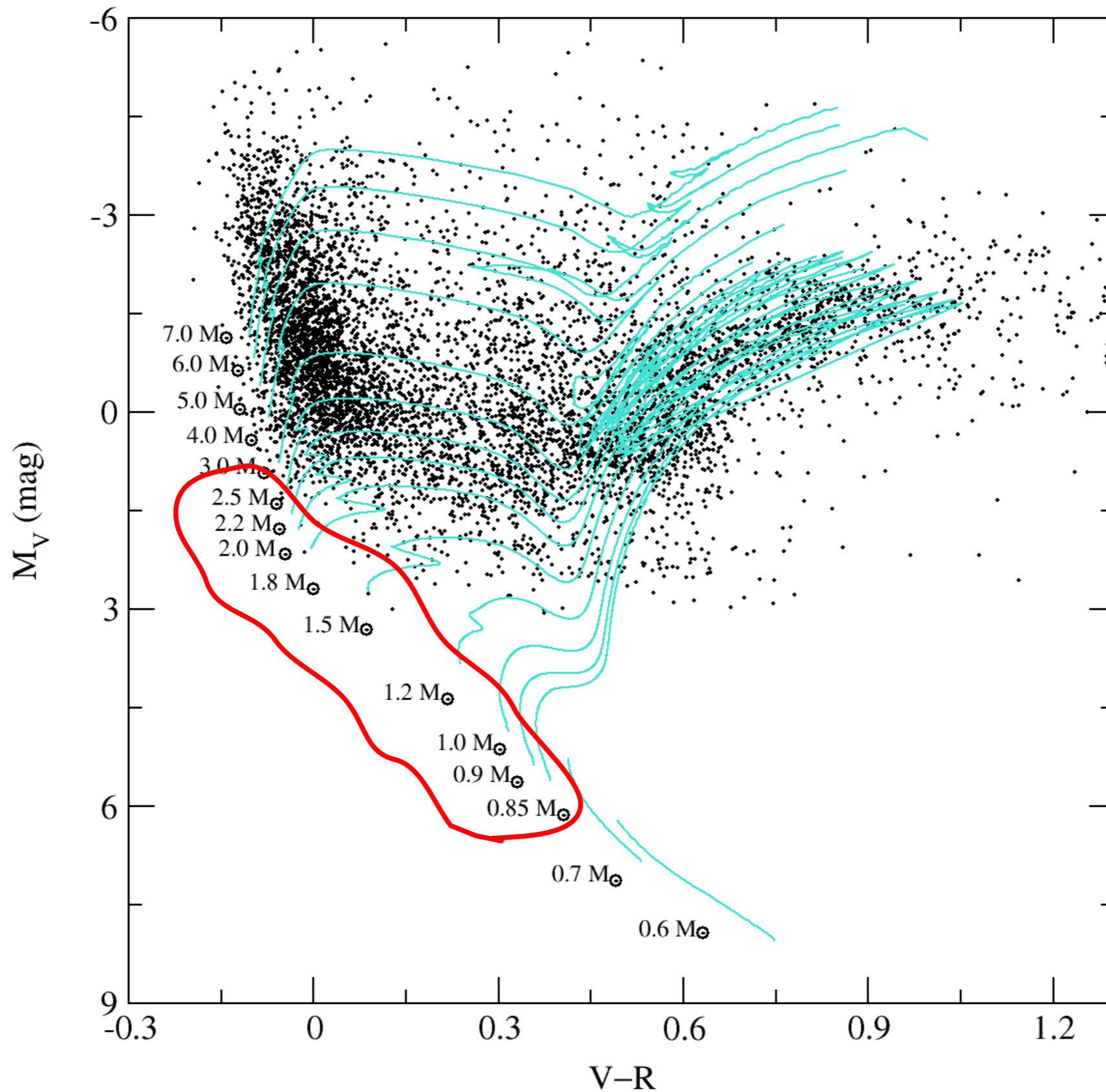
Hertzsprung-Russell-diagram ~ kb. a csillagok fázisdiagramja



(Russell, 1914,
Nature)



(S. Balm)



MACHO változócsillagok az LMC-ben, ill. fémszegény csillag-fejlődési modellek (Derekas, Kiss & Bedding 2007)

A nagytömegű csillagok fejlődése (Meynet & Maeder 2003)

